

**Untersuchung der zeitlichen Abhängigkeit von Löseprozessen in hochalkalischen Lösungen zur  
Charakterisierung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen**

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung der Brandenburgischen  
Technischen Universität Cottbus - Senftenberg zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Jens Kronemann

aus Cottbus

Gutachter: apl. Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Hüniger

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Dietmar Stephan

Gutachter: apl. Prof. Dr. rer. nat. habil. Siegfried Vieth

Tag der Disputation: 27. April 2015

## Kurzfassung

Die schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Beton stellt in Teilbereichen nach wie vor ein Problem bei der Bewertung der Dauerhaftigkeit von Beton dar. Eine der häufigsten Fragestellungen ist immer noch eine schnelle und sichere Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen für die Betonherstellung. Darüber hinaus erscheint in Zeiten der Ressourceneinsparung der Ausschluss von Gesteinskörnungen auf Grund unzureichender Kenntnis der Alkaliempfindlichkeit nicht zukunftsorientiert. Weiterhin wird oft nur die makroskopische Betrachtung von Betonen oder Mörtelprismen zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen herangezogen, wobei die bei der AKR stattfindenden Prozesse nicht genügend berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Beitrag von Gesteinskörnungen zur AKR im Beton untersucht, um die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen zu quantifizieren und die zu erwartende Schädigung des Betons durch die Gesteinskörnung detaillierter als bisher klassifizieren zu können. Im Vordergrund der Arbeit stand dabei das Verständnis der Auflösungsprozesse von Gesteinskörnungen in KOH-Lösungen ( $\text{pH} \geq 13$ ) bei unterschiedlichen Reaktionsbedingungen.

An vier Gesteinskörnungen wurde der 40 °C-Betonversuch durchgeführt, um die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen zu dokumentieren. Weiter wurden die Gesteinskörnungen mit dem Schnellprüfverfahren untersucht sowie petrografisch und mineralogisch begutachtet. Dabei stimmten die Ergebnisse nur teilweise mit denen des 40 °C-Betonversuchs überein. Anhand von Löseversuchen an den originalen Lieferkörnungen der Gesteinskörnungen bei 40 °C und mit 1,0 M KOH-Lösung war es möglich, die Reaktivität der Gesteinskörnungen mit den ermittelten  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der alkalischen Lösungen zu beschreiben. Bei den Untersuchungen von verschiedenen Varianten zur Beschleunigung der Löseversuche konnten durch eine erhöhte Temperatur von 80 °C und eine abgesenkte Konzentration der KOH-Lösung von 0,1 M innerhalb von 56 Tagen vergleichbare Ergebnisse zu den Resultaten der Löseversuche bei 40 °C und 1,0 M KOH-Lösung erreicht werden.

In der alkalischen Lösung wird ein bestimmter Teil des gelösten  $\text{SiO}_2$  durch ebenfalls vorhandenes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aluminosilikatisch gebunden. Der verbleibende Teil des gelösten  $\text{SiO}_2$  steht für eine AKR zur Verfügung. Aus der zeitabhängigen Darstellung dieser  $\text{SiO}_2$ -Konzentration wurde die Lösegeschwindigkeit ermittelt. Dabei wurden vier aufeinanderfolgende Phasen dem Dehnungs- und Rissbreitenverlauf der Probekörper des 40 °C-Betonversuchs zugeordnet. Zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung sind die Lösegeschwindigkeiten der letzten drei Phasen entscheidend.

Nach der Entwicklung dieser Vorgehensweise an den vier untersuchten Gesteinskörnungen wurde diese Methode bei weiteren Gesteinskörnungen angewendet. Die ermittelten Lösegeschwindigkeiten stellten ebenfalls ein exaktes Abbild der Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs dar. Die entwickelte Methode bietet eine Möglichkeit, die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung schnell, sicher und genauer als bisher zu bestimmen. Besonders vorteilhaft sind dabei die direkte Prüfung der Gesteinskörnung an der originalen Korngröße (Lieferkörnung), wie diese auch im Beton eingesetzt wird, die zementunabhängige Prüfung, sowie die einfache experimentelle Durchführung und Auswertung.

Darüber hinaus zeigte sich bei der Anwendung der Methode, dass neben der Gesteinskörnung selbst auch der Einfluss von Zusatzstoffen auf die Löslichkeit von Gesteinskörnungen beurteilt werden kann. Erste Ergebnisse belegen den löseinhibierenden Effekt des aluminiumhaltigen Zusatzstoffes Metakaolin durch die Blockierung der Oberfläche einer reaktiven Gesteinskörnung im Alkalischen.

## Abstract

The alkali-silica reaction (ASR) in concrete still presents a problem in assessing the durability of concrete structures. In this context an important question is a fast and reliable evaluation to identify the ASR-sensibility of aggregates. Furthermore in times of the economization of resources the exclusion of aggregates from concrete production by reason of the insufficient knowledge of their ASR-sensibility does not seem future-oriented. Concrete prism tests only evaluate the ASR-sensibility of aggregates by observing macroscopic effects while ASR-processes are often unconsidered.

This research investigated the contribution of aggregates to ASR in concrete to quantify the sensibility of aggregates and to classify the destruction of concrete caused by ASR-sensitive aggregates in a more precise way. The main focus of this thesis aimed the understanding of dissolution processes of aggregates in high alkaline solutions ( $\text{pH} \geq 13$ ) at different conditions.

The ASR-sensibility of four aggregates was evaluated by performing the German 40 °C concrete prism test in a fog chamber. In a next step the 80 °C accelerated mortar bar test was conducted. In addition petrographic and mineralogical investigations were also considered to assess the reactivity of the aggregates. These results only partly agreed with those of the 40 °C concrete prism test. Moreover dissolution experiments were performed with the aggregates in their original grain sizes and with 1.0 M KOH-solution at a storage temperature of 40 °C. By measuring the concentration of silica and alumina of the alkaline solutions the ASR-sensibility of the four aggregates could be described. Furthermore different possibilities were tried out to accelerate the solution test. At a higher temperature of 80 °C and a lowered concentration of the KOH-solution of 0.1 M comparable results to the conditions of 40 °C and 1.0 M KOH-solution could be achieved in a period of 56 days.

Within the alkaline solution a certain part of the soluble silica is bonded by dissolved alumina in aluminosilicate structures. The remaining part of the soluble silica is available for ASR. Solution rates were calculated from the time-dependent account of this available silica. For that matter four sequent periods were correlated to the expansions and crack widths of the specimens of the 40 °C concrete prism test. To assess the ASR-sensibility of an aggregate the last three periods are essential.

After developing this method with the four aggregates investigated this method was performed with more aggregates. The measured solution rates accurately reproduced the results of the 40 °C concrete prism test. This method provides a possibility to reliably evaluate the ASR-sensibility of an aggregate in a short time and in a more detailed way as up to now. Especially the direct assessment of the aggregate on the original grain like it is used in concrete, the independence of the influence of the cement and the simple experimental performance and analysis are advantageous.

Furthermore it is shown that in addition to the aggregate also the influence of supplementary cementing materials (SCMs) on the solubility of aggregates could be appraised. First results document the inhibiting effect from the SCM metakaolin on the solubility of aggregates by surface blocking of the aggregate in alkaline solutions.

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand des Wissens .....	2
2.1	Alkali-Kieselsäure-Reaktion .....	2
2.2	Ausgewählte Prüfverfahren und deren Grenzen .....	3
2.3	Schädigungsmechanismen und Modellvorstellungen.....	5
2.4	Einfluss der Zementsteinmatrix.....	8
2.5	Einfluss von Gesteinskörnungen .....	10
2.5.1	Mineralogie und Petrografie .....	10
2.5.2	Löseversuche .....	11
2.5.3	Physikalische Eigenschaften der Gesteinskörnung .....	15
2.6	Zusammenfassung des Wissenstandes .....	19
3	Ziele und Vorgehensweise.....	21
4	Versuchsdurchführung .....	23
4.1	Ausgangsmaterialien und deren Charakterisierung.....	23
4.1.1	Zement.....	23
4.1.2	Gesteinskörnungen.....	23
4.1.3	Zusatzstoffe .....	27
4.2	Untersuchungsmethoden und Analyseverfahren .....	27
4.2.1	Auspressversuche am Zementstein.....	27
4.2.2	Mineralogische Analyse der Gesteinskörnungen mittels Röntgenbeugung .....	27
4.2.3	40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung.....	27
4.2.4	Schnellprüfverfahren.....	28
4.2.5	BTU-SP-Test .....	28
4.2.6	Löseversuche .....	29
4.2.7	Optische Emissionsspektrometermethode mit induktiv gekoppeltem Plasma .....	31
4.2.8	Acidimetrische Titration .....	31
4.2.9	Ionenchromatografie.....	31
4.2.10	μ-Röntgen 3D-Computertomografie .....	31
5	Ergebnisse und Diskussion .....	32
5.1	Beton- und Mörtelprüfungen .....	32
5.1.1	40 °C-Betonversuch .....	32
5.1.2	Schnellprüfverfahren.....	33
5.2	Petrografische und mineralogische Begutachtung .....	35
5.2.1	Petrografische Begutachtung .....	35

---

5.2.2	Mineralogische Begutachtung.....	36
5.3	Löseversuche .....	37
5.3.1	Löseversuche 40 °C / 1,0 M KOH-Lösung .....	37
5.3.1.1	Bestimmung der Konzentration an gelöstem SiO <sub>2</sub> .....	37
5.3.1.2	Bestimmung der Konzentration an gelöstem Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	41
5.3.2	Parameter zur Beschleunigung des Löseversuchs.....	45
5.3.3	Parameter der Löseversuche zur Beschreibung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung.....	60
5.3.3.1	Bestimmung an überschüssigen SiO <sub>2</sub> in der Lösung.....	60
5.3.3.2	Bestimmung der Lösegeschwindigkeit .....	62
5.4	Beitrag der Gesteinskörnung zur AKR im Beton.....	62
5.4.1	Phasen einer AKR aus der Diskussion von Reaktionsabläufen der Gesteinskörnung .....	62
5.4.2	Lösegeschwindigkeiten zur Beschreibung von Reaktionsabläufen der Gesteinskörnung .....	65
5.5	Einfluss von physikalischen Eigenschaften.....	68
5.5.1	Wasseraufnahme der Gesteinskörnung.....	68
5.5.2	Berücksichtigung der offenen Porosität der Gesteinskörnung - BTU-SP-Test .....	71
5.5.3	Bestimmung der Oberfläche von Gesteinskörnungen .....	73
5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	76
6	Anwendung der Methode auf andere Gesteinskörnungen .....	77
6.1	Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit einem breiten Spektrum der Lösegeschwindigkeiten ...	77
6.2	Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit sehr geringen Lösegeschwindigkeiten.....	79
6.3	Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit hohen Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 sowie einer stark reduzierten Lösegeschwindigkeit in der Phase 3.....	80
6.4	Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit einer sehr hohen Lösegeschwindigkeit in der Phase 1..	82
6.5	Fallbeispiel: Sonderfall Kiese .....	83
7	Einfluss von Zusatzstoffen auf die Auflösung von Gesteinskörnungen in alkalischen Lösungen.....	86
7.1	Einfluss des Siliziums .....	86
7.2	Einfluss des Aluminiums .....	88
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	93
	Literaturverzeichnis .....	97
A	Anhang.....	A.1-1
A.1	Ergebnisse - Mörtel- und Betonversuche .....	A.1-1
A.2	Ergebnisse - Löseversuche.....	A.2-1

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schäden durch AKR an einem Bauwerk - Unterführung Cottbus .....	3
Abbildung 2:	Auflösung von kristallinem und amorphem $\text{SiO}_2$ [42] .....	6
Abbildung 3:	Mechanismus der AKR [44, 45].....	7
Abbildung 4:	Abhängigkeit zwischen der Enddehnung der Balken des 40 °C-Betonversuchs und dem maximalen $\text{SiO}_{2\text{übb}}$ in der Lösung mit präkambrischen Grauwacken [93].....	13
Abbildung 5:	Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit vom w/z-Wert und der Festigkeitsklasse des Zements [122, 123] .....	16
Abbildung 6:	Gegenüberstellung der offenen Porosität von Gesteinskörnungen und der Dehnung der Balken des 40 °C-Betonversuchs [136].....	17
Abbildung 7:	Aufbau der Arbeit .....	22
Abbildung 8:	BTU-SP-Test - Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen [134]....	29
Abbildung 9:	Ablauf des Löseversuchs.....	30
Abbildung 10:	Ergebnisse - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnungen 1 bis 4.....	32
Abbildung 11:	Ergebnisse - Schnellprüfverfahren der Gesteinskörnungen 1 bis 4.....	34
Abbildung 12:	$\text{SiO}_2$ -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C.....	38
Abbildung 13:	Gewichtete $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C .....	40
Abbildung 14:	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C.....	42
Abbildung 15:	Gewichtete $\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C.....	44
Abbildung 16:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnung 1 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C mit Feststoff-Laugen-Verhältnis 1:10 und 1:2.....	46
Abbildung 17:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C .....	48
Abbildung 18:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 60 °C .....	50
Abbildung 19:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	52
Abbildung 20:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C, 60 °C und 80 °C.....	53
Abbildung 21:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 bei 80 °C in Abhängigkeit von der KOH-Konzentration (1,0 M bis 0,5 M).....	56
Abbildung 22:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	57
Abbildung 23:	$\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	58
Abbildung 24:	Gewichtete $\text{SiO}_2$ - und $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C.....	59

Abbildung 25: Gegenüberstellung - Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs und gewichteter SiO <sub>2</sub> -Überschuss des Löseversuchs in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	61
Abbildung 26: Zeitintervalle - Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs und gewichteter SiO <sub>2</sub> -Überschuss des Löseversuchs in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	64
Abbildung 27: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in den Phasen 0 bis 3 .....	66
Abbildung 28: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in den Phasen 1 bis 3 .....	67
Abbildung 29: BTU-SP-Test - Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen 1 bis 4 ..	72
Abbildung 30: Oberfläche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 1 (links: Korn 1, rechts: Korn 4) [BAM, Dr. Weise].....	75
Abbildung 31: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen A bis E in den Phasen 1 bis 3.....	77
Abbildung 32: Gegenüberstellung der Lösegeschwindigkeiten (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) und der Dehnungen (40 °C-Betonversuch) der Gesteinskörnungen A bis E.....	78
Abbildung 33: Gegenüberstellung der SiO <sub>2</sub> -/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen und der Lösegeschwindigkeiten (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) der Gesteinskörnungen F und G.....	80
Abbildung 34: Gegenüberstellung der Lösegeschwindigkeiten (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) und der Dehnungen (40 °C-Betonversuch) der Gesteinskörnungen Hr und Hg.....	81
Abbildung 35: Gegenüberstellung der Lösegeschwindigkeiten (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) und der Dehnungen (40 °C-Betonversuch) der Gesteinskörnungen A, Hg und K .....	83
Abbildung 36: Lösegeschwindigkeiten der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 1.....	84
Abbildung 37: Lösegeschwindigkeiten der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 4.....	85
Abbildung 38: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnung A und Microsilica .....	87
Abbildung 39: Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnung A mit und ohne Microsilica..	88
Abbildung 40: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnung A und Metakaolin.....	89
Abbildung 41: SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuch von Metakaolin (0,9 g) in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C.....	89
Abbildung 42: Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnung A mit und ohne Microsilica..	90
Abbildung 43: Lösegeschwindigkeiten - Löseversuch (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) von Metakaolin (verschiedene Mengen) in Kombination mit der Gesteinskörnung A .....	90
Abbildung 44: Gesteinskörnung A ohne Metakaolin - links: vor der Lagerung/ rechts: nach 14 d Lagerung in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	91
Abbildung 45: Gesteinskörnung A mit Metakaolin - links: vor der Lagerung/ rechts: nach 14 d Lagerung in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	91

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Physikalische Eigenschaften - Prüfzement CEM I 32,5 R [Lieferangaben 2011 VDZ e.V.] .....	23
Tabelle 2:	Chemische Zusammensetzung in M.-% - Prüfzement CEM I 32,5 R [Lieferangaben 2011 VDZ e.V.] .....	23
Tabelle 3:	Mineralogische Zusammensetzung in M.-% - Prüfzement CEM I 32,5 R [Lieferangaben 2011 VDZ e.V.] .....	23
Tabelle 4:	Kennwerte - Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 (GK 1 bis GK 4) .....	24
Tabelle 5:	Siebrückstände in M.-% - Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	24
Tabelle 6:	Petrografische Zusammensetzung in M.-% - Korngruppe 8/16 mm der Kiese (Gesteinskörnung 1 und 4) - Zuordnung der Geröllkomponenten nach DIN EN 932-3 [82] .....	25
Tabelle 7:	Mineralogische Zusammensetzung in M.-% - Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	26
Tabelle 8:	Chemische Zusammensetzung in M.-% - Microsilica und Metakaolin [Hersteller-Lieferangaben].....	27
Tabelle 9:	Zusammensetzung der Porenlösung des Zementsteins nach 90 d in mmol/l.....	37
Tabelle 10:	Gegenüberstellung der SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 40 °C und 60 °C.....	51
Tabelle 11:	Gegenüberstellung der SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 40 °C und 80 °C.....	53
Tabelle 12:	Gegenüberstellung der mittleren Reaktionsgeschwindigkeiten der SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C, 60 °C und 80 °C .....	54
Tabelle 13:	Absenkung des w/z-Wertes in Abhängigkeit der Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	70
Tabelle 14:	Gegenüberstellung der k-Werte der Gesteinskörnungen 1 bis 4.....	74
Tabelle 15:	Oberflächen einzelner Körner der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 1 mittels 3D-CT-Messung [BAM, Dr. Weise].....	75
Tabelle 16:	Gegenüberstellung der 4 Phasen - 80 °C-Löseversuch in 0,1 M KOH-Lösung und 40 °C-Betonversuch .....	94
Tabelle 17:	Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit der untersuchten Gesteinskörnungen - 40 °C-Betonversuch (blau: EI-S, braun: EIII-S) und 80 °C-Löseversuch in 0,1 M KOH-Lösung (grün: nicht reaktiv, gelb: grenzwertig reaktiv, rot: reaktiv, hellrot: sehr reaktiv).....	96
Tabelle A-1:	Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	A.1-1
Tabelle A-2:	Dehnungen - Schnellprüfverfahren der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	A.1-1
Tabelle A-3:	Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnungen A bis K .....	A.1-2
Tabelle A-4:	Dehnungen - 40 °C-Betonversuch: Gesteinskörnung A + 1,0 M.-% Microsilica, Gesteinskörnung A + 1,0 M.-% Metakaolin .....	A.1-2



Tabelle A-5: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C .....	A.2-1
Tabelle A-6: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C .....	A.2-1
Tabelle A-7: SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnung 1 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C mit Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:2 .....	A.2-2
Tabelle A-8: SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 60 °C .....	A.2-2
Tabelle A-9: SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-2
Tabelle A-10: SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,75 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-3
Tabelle A-11: SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,5 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-3
Tabelle A-12: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-3
Tabelle A-13: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-3
Tabelle A-14: Ergebnisse - BTU-SP-Test der Gesteinskörnungen 1 bis 4 .....	A.2-4
Tabelle A-15: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen A bis D in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-4
Tabelle A-16: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen A bis D in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-4
Tabelle A-17: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen E, F, G und K in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-4
Tabelle A-18: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen E, F, G und K in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-4
Tabelle A-19: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen Hr und Hg in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-5
Tabelle A-20: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen Hr und Hg in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-5
Tabelle A-21: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 1 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-5
Tabelle A-22: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 1 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-5
Tabelle A-23: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-6
Tabelle A-24: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C .....	A.2-6
Tabelle A-25: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Microsilica (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A .....	A.2-6
Tabelle A-26: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Microsilica (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A .....	A.2-6
Tabelle A-27: SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A .....	A.2-7

---

Tabelle A-28: $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A.....	A.2-7
Tabelle A-29: $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,1 M.-%), Gesteinskörnung A.....	A.2-7
Tabelle A-30: $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,1 M.-%), Gesteinskörnung A.....	A.2-7
Tabelle A-31: $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,3 M.-%), Gesteinskörnung A.....	A.2-8
Tabelle A-32: $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,3 M.-%), Gesteinskörnung A.....	A.2-8
Tabelle A-33: $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,5 M.-%), Gesteinskörnung A.....	A.2-8
Tabelle A-34: $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,5 M.-%), Gesteinskörnung A.....	A.2-8

---

Abkürzungsverzeichnis

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
ASR	alkali-silica reaction
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BTU	Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
BTU-SP-Test	Brandenburgische Technische Universität - Löse- und Porositäts-Test
C <sub>2</sub> S	Dicalciumsilikat
C <sub>3</sub> A	Tricalciumaluminat
C <sub>3</sub> S	Tricalciumsilikat
C <sub>4</sub> AF	Calciumaluminatferrit
C-A-S-H	Calciumaluminatsilikathydrat
C-S-H	Calciumsilikathydrat
CT	Computertomografie
GK	Gesteinskörnung
HDPE	Polyethylen hoher Dichte
ICP-OES	Optisches Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
k-Wert	Körnungsziffer
max.	Maximal
NA-Zement	Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Na <sub>2</sub> O-Äquivalent
PST	Prüfgesellschaft für Straßen- und Tiefbau mbH & Co.KG
SCMs	supplementary cementing materials
SiO <sub>2</sub> <sub>üb</sub>	SiO <sub>2</sub> -Überschuss
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert
WA <sub>24</sub>	Wasseraufnahme nach 24 Stunden
XRD	X-Ray Diffraction, Röntgendiffraktometrie

## 1 Einleitung

Beton zählt zu den am meisten verwendeten Baustoffen der Welt [1]. In Zeiten immer komplexerer Bauvorhaben besteht ein großes Interesse an diesem Massenprodukt mit seinen zahlreichen Einsatzmöglichkeiten. Beton wirbt dabei mit einer hohen Belastbarkeit, einer individuellen Formbarkeit und einer langjährigen Dauerhaftigkeit. Besonders der letzte Punkt und die damit verbundene Nutzungsdauer für Betonbauteile von mehreren Jahrzehnten sind durch Schädigungen des Betongefüges in Frage gestellt [2].

Im Jahr 1940 berichtet Thomas E. Stanton [3] erstmalig über schädigende Dehnungen von Beton, welche auf chemische Reaktionen des Zements und der Gesteinskörnung zurückzuführen sind. Er zeigt, dass hierbei der Zement einen hohen Alkaligehalt und die Gesteinskörnung bestimmte chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen müssen. Darüber hinaus entwickelt er anhand der aufgetretenen Schäden an Bauwerken und mehreren Laborversuchen ein erstes Testverfahren zur Beurteilung des Betons.

Die durch Stanton beschriebene Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) stellt in Teilbereichen nach wie vor ein Problem bei der Bewertung der Dauerhaftigkeit von Beton dar. Eine der häufigsten Fragestellungen ist immer noch eine schnelle und sichere Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen für die Betonherstellung. Die Ergebnisse bei Betonversuchen sind erst nach fünf (60 °C-Betonversuch) beziehungsweise neun Monaten (40 °C-Betonversuch) aussagefähig und beim Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie [4] wird im Zweifelsfall wiederum der 40 °C-Betonversuch durchgeführt.

Eine weitere Frage ergibt sich aus dem Umgang mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen. Das derzeitige Regelwerk (Alkali-Richtlinie) [4] sieht hier in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse den Austausch der Gesteinskörnung, die Verwendung von NA-Zement oder die Performance Prüfung durch Gutachter vor. Auf Grund unzureichender Kenntnis der Alkaliempfindlichkeit erscheint der Ausschluss von Gesteinskörnungen in Zeiten der Ressourceneinsparung nicht zukunftsorientiert.

Ein ähnliches Bild stellt sich bei der Betrachtung internationaler Forschungsaktivitäten dar. Zum Teil wird hier die erhöhte Temperatur bei angewendeten Prüfungen in Frage gestellt [5, 6, 7]. Weiterhin wird oft nur die makroskopische Betrachtung von Betonen oder Mörtelprismen zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen herangezogen und dabei das Verständnis für stattfindende Prozesse bei der AKR nicht genügend berücksichtigt.

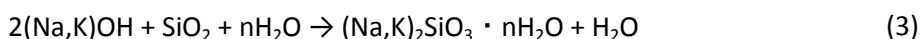
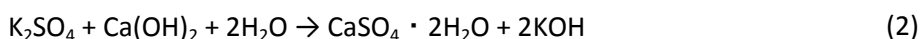
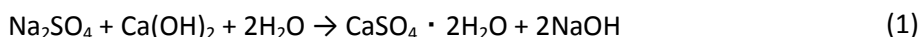
In der folgenden Literaturübersicht werden der grundlegende Ablauf einer AKR sowie international und national verwendete Prüfverfahren zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen dargestellt. Die verschiedenen Modellvorstellungen stellen die Komplexität der Schädigungsmechanismen einer AKR heraus. Weiter werden die Faktoren, die durch die Zementsteinmatrix und die Gesteinskörnung bestimmt sind, einzeln betrachtet. Insbesondere die vielfältigen Eigenschaften von Gesteinskörnungen werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die AKR beschrieben.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist eine Reaktion im Beton, bei welcher die reaktive  $\text{SiO}_2$ -haltige Gesteinskörnung mit den vorhandenen Alkalien, welche aus dem Bindemittel stammen oder von außen eindringen, unter Feuchtigkeitseinwirkung reagiert [8]. Dieser Prozess bewirkt die Bildung von Reaktionsprodukten bestehend aus quellfähigen Alkalisilikathydraten, welche eine Gefügestörung in der Gesteinskörnung hervorrufen können, die sich in Porenräumen des Zementsteins einlagern und aufgrund von Volumenvergrößerungen Rissbildungen im Beton hervorrufen [9]. Die genannte Gefügestörung in der Gesteinskörnung tritt nach Shayan und anderen [10] infolge einer Alkali-Silikat-Reaktion auf, bei welcher die Alkalien entlang von Kristallkorngrenzen in den feinkristallinen bzw. gestörten Quarz diffundieren und dort entlang von Gefügedefekten, wie Mikrorissen, zum Aufsprengen der Gesteinskörnung führen. Bei dieser Reaktion bilden sich nur sehr geringe Gelmengen. Im Gegensatz dazu kommen häufig massive Gelausscheidungen bei der klassischen Alkali-Kieselsäure-Reaktion vor, wobei die schneller reagierenden Gesteinskörnungen durch die Volumenausdehnung des Gels den Beton schädigen [11]. Die Gelbildung findet hier bevorzugt im Kontaktbereich zwischen dem Gesteinskorn und dem Zementstein statt [12]. In der weiteren Abfolge werden beide Reaktionsarten simultan unter dem Begriff der AKR verwendet. Die Alkali-Carbonat-Reaktion wird ebenfalls in der Literatur als betonschädigende Reaktion beschrieben [13] und findet kombiniert mit der AKR statt [14]. Andere Autoren [15] betrachten beide Reaktionen als kongruent. Die Alkali-Carbonat-Reaktion findet folgend keine weitere Betrachtung.

Der Ablauf der AKR kann wie folgt beschrieben werden. Die silikatischen Klinkerminerale des Zements spalten bei Wasserzugabe infolge Hydrolyse in einem ersten Schritt Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ab. In diesem alkalischen Milieu kommt es dann zur Bildung der für die Festigkeit und Dauerhaftigkeit wichtigsten Bestandteile, den Calciumsilikathydratphasen (C-S-H-Phasen). Die leicht löslichen Alkalisulfate des Zementes reagieren mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zu schwerer löslichem Calciumsulfat und Alkalihydroxid. Weitere Alkalien sind in den Klinkerphasen eingebaut und werden erst bei der Hydratation freigesetzt. In der Porenlösung des Zementsteins stellt sich in Abhängigkeit vom  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent ein pH-Wert von über 12,5 ein. Anschließend diffundieren Natrium- und Kaliumionen zu amorphen, feinkristallinen oder in ihrer Struktur gestörten  $\text{SiO}_2$ -Bestandteilen der Gesteinskörnung und bilden zusammen mit  $\text{OH}^-$ -Ionen in feuchter Umgebung Alkalisilikathydrat. Dieser Reaktionsablauf wird in den Gleichungen (1) bis (3) dargestellt [16].



Die nach Gleichung (3) gebildeten Gele sind in der Lage, sehr viel Wasser aufzunehmen. Diese Volumenzunahme des Alkalisilikathydrats bedingt einen zunehmenden Quelldruck, welcher beim Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons oder der Gesteinskörnung schädigend wirken kann und zum Versagen führt. Makroskopisch wird dies durch Risse an der Betonoberfläche sichtbar.

Die Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein stark geschädigtes Bauwerk mit netzartiger Rissbildung. Untersuchungen an Bohrkernproben belegen, dass die Schädigung auf eine AKR zurückzuführen ist. Als

Ursachen konnten hier der Einsatz einer alkaliempfindlichen Grauwacke, eine stetige Durchfeuchtung, sowie ein hoher Alkaligehalt des Zementsteins festgestellt werden.



Abbildung 1: Schäden durch AKR an einem Bauwerk - Unterführung Cottbus

Die erforderlichen Maßnahmen gegen eine schädigende AKR sind in Deutschland durch die Alkali-Richtlinie [4] und in anderen Ländern über ähnliche Regelungen [17, 18, 19, 20] beschrieben. Die Alkali-Richtlinie [4] gibt für verschiedene Empfindlichkeitsklassen der Gesteinskörnung die erforderlichen Maßnahmen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse der Baumaßnahme vor. Wie schwierig jedoch die Einstufung der Gesteinskörnung in Empfindlichkeitsklassen ist, zeigt eine ausführliche Literaturübersicht von Lindgard et al. [21], welche AKR-beeinflussende Parameter bei einer Prüfung zusammenfasst. Dies sind Lagerungsbedingungen wie Temperatur und Feuchte, der Alkaligehalt der Porenlösung, die Rolle des Calciumhydroxids, die Art, Menge und Größe der Gesteinskörnung, der Luftporengehalt, die Porenräume und der w/z-Wert des Betons sowie die Probekörpergeometrie. Allein diese Anzahl von einflussnehmenden Faktoren bei einer AKR-Prüfung zeigt die Komplexität der AKR und deren Prüfung. Darüber hinaus wird auch deutlich, wie schwierig es ist, eine AKR im Labor nachzustellen bzw. unter beschleunigten Bedingungen realitätsnah zu simulieren, um Vorhersagen für spätere Betonbauwerke zu treffen.

## 2.2 Ausgewählte Prüfverfahren und deren Grenzen

Zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen existiert eine Vielzahl von Prüfverfahren. Im Folgenden werden einige Prüfverfahren exemplarisch aufgeführt. Ziel ist es dabei, die Grenzen und Probleme von bestehenden Prüfverfahren aufzuzeigen, um dadurch optimale Versuchsparameter für eine Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen unter Laborbedingungen herauszuarbeiten.

National wie auch international gilt der 40 °C-Betonversuch, vergleichbar dem 38 °C-Concrete Prism Test, als zuverlässigstes Prüfverfahren, welches die Realität am besten abbildet [4, 22, 7, 23, 24, 25]. Folliard und andere [22, 23, 24] sind sich einig, dass eine weitere Beschleunigung durch beispielsweise eine weitere Temperaturerhöhung die Zusammensetzung der Porenlösung des Zementsteins verändert bzw. Auslaugungsprobleme verursacht [23, 24]. Bei Mörtel- und Betonversuchen mit Lagerungstemperaturen von 60 °C und höher weisen Hünge und andere [26] die Zersetzung des Etringits nach, wodurch die Hydroxidionenkonzentration des Zementsteins sinkt und die Sulfationenkonzentration steigt. Die gemessenen Dehnungen an Mörtel- und Betonprobekörpern sind bei Lagerungstemperaturen über 60 °C nicht ausschließlich auf eine AKR zurückzuführen.

Folliard und andere [22] zeigen Fälle auf, bei denen Gesteinskörnungen im 40 °C-Betonversuch bestanden haben und im 80 °C-Schnellprüfverfahren nicht bestehen. Doch die Autoren weisen auch auf entgegengesetzte Ergebnisse hin, bei denen Gesteinskörnungen im 80 °C-Schnellprüfverfahren bestehen, aber im 40 °C-Betonversuch oder bei der Außenlagerung durchfallen. Weiterhin berichten sie von verfälschten Ergebnissen durch die Prüfung der Korngruppen in Mischung und empfehlen daher die groben und weniger groben Gesteinskörnungen getrennt zu prüfen. In [7] werden diese Erkenntnisse von Thomas und anderen noch weiter ausgeführt. Der Fokus liegt hier besonders bei spät reagierenden Gesteinskörnungen, bei denen die Anwendung beschleunigter Verfahren (60 °C-Betonversuch, 80 °C-Schnellprüfverfahren) problematisch gesehen wird. Entgegen dieser Erfahrungen zeigt ein Forschungsbericht von Franke [27] zur Anwendbarkeit des 80 °C-Schnellprüfverfahrens auf deutsche Gesteinskörnungen, dass durchaus gute Korrelationen zum 40 °C-Betonversuch bestehen. Eine Schwankungsbreite der Ergebnisse ist bei diesen Untersuchungen lediglich bei Kiesen festzustellen, welche mit inhomogenen Zusammensetzungen der Ausgangsmaterialien begründet wird. Darüber hinaus wird bei Kiesen die Prüfung der Lieferkörnung in Mischung als auch der einzelnen Lieferkörnungen empfohlen, um dadurch übereinstimmende Ergebnisse mit dem 40 °C-Betonversuch zu erzielen. Bei gebrochenen Gesteinen ist die Prüfung der Lieferkörnung 8/16 mm ausreichend. Shayan und andere [28] stehen dem Brechen der Gesteinskörnung für Laborversuche, wie dem Schnellprüfverfahren, kritisch gegenüber. Bei der Verwendung der Lieferkörnung wären die neu geschaffenen Oberflächen nicht vorhanden. Lindgard und andere [21] fordern ebenfalls die Prüfung der Lieferkörnung und weisen auf Veränderungen der Gesteinskörnungseigenschaften beim Brechen für Laborversuche hin.

Nach Ergebnissen eines AiF-Forschungsvorhabens des Forschungsinstituts der Zementindustrie [29] zur Alkalireaktivität von Prüfsanden erweist sich eine Prüfung der groben Gesteinskörnung als schwierig, solange der Einfluss des Sandes ungeklärt ist. Das bestehende Schnellprüfverfahren der Alkali-Richtlinie ist für die Prüfung von Sanden ungeeignet. Veränderungen der Dehnungen bei verschiedenen Sanden und gleichen groben Gesteinskörnungen belegen Ideker und andere [24].

Bokern [30] vergleicht verschiedene Prüfverfahren und stellt fest, dass mit steigendem Alkaligehalt des Betons und zunehmender Lagerungstemperatur die Viskosität des Alkalisilikathydrats abnimmt. Weiterhin beobachtet er bei porösen Gesteinskörnungen durch den größeren Pufferraum geringere Dehnungen bei vergleichbarem Quelldruck. Er bestimmt deutlich geringere Hydroxid- und Alkaliionenkonzentrationen bei 60 °C im Vergleich zu 40 °C in der Porenlösung, schließt aber eine mögliche Kompensation der geringen Konzentrationen durch erhöhte Freisetzen von  $\text{SiO}_2$  nicht aus. Eine Verdünnung der Porenlösung sowie Auslaugungen beim 40 °C-Betonversuch durch die Nebelkammerlagerung und eine intensive Auslaugung der Probekörper bei 60 °C ist seinen Ergebnissen zu entnehmen. In [6] wird gezeigt, dass eine Temperaturerhöhung nicht zwangsläufig die Auslaugung von

Probekörpern erhöht. Darüber hinaus ist die Auslaugung der am stärksten steuernde Einfluss beim 60 °C-Betonversuch. Leemann und Lothenbach [31] führen abflachende Dehnungskurven in Betonversuchen unter anderem auf Auslaugungsprobleme zurück, nennen aber zusätzlich die Einbindung von Alkalien in Gelstrukturen als Begründung. Auch Rivard und andere [32, 33] bestätigen Auslaugungsprobleme, besonders bei wenig reaktiven Gesteinskörnungen. Dabei fehlt nach Autorenmeinung die notwendige Alkalität der Porenlösung für die Reaktion. Nach 52 Wochen im 40 °C-Betonversuch ist der Alkaligehalt der Porenlösung auf 250-270 mmol/l gesunken. Abhängig von der Mischungszusammensetzung des Betons wird eine Alkaliionenkonzentration von 205-335 mmol/l als Grenzwert für eine stattfindende AKR benannt. Kagimoto und andere [34] bestätigen durch Porenlösungsuntersuchungen an Mörteln den von Oberholster und Davies [35] benannten Schwellenwert der Hydroxidionenkonzentration von 250 mmol/l und weisen dabei auf die starke Abhängigkeit dieses Werts von der verwendeten Gesteinskörnung hin.

Nach der Auswertung von zahlreichen Feldversuchen und Außenlagerungen mit einer Dauer von über 10 Jahren und dem Vergleich dieser Ergebnisse mit möglichen Testverfahren empfehlen Fournier und andere [36] eine Kombination aus mehreren Untersuchungen: Petrografie, Dehnungsmessungen und chemische Tests zur Beurteilung einer Gesteinskörnung durchzuführen. In der Veröffentlichung weisen sie konkret auf Widersprüche zwischen dem 80 °C-Schnellprüfverfahren und dem 40 °C-Betonversuch hin.

Kein Test kann alles - nach Thomas und anderen [7] beinhaltet ein idealer Test:

- Einstufung der Reaktivität der Gesteinskörnung
- schnelle und wiederholbare Ergebnisse
- Vermeidung des Brechens der Gesteinskörnung
- Beachtung des Alkaligehalts und der Expositionsklasse des Betons

Grundannahme eines jeden Tests sind bestimmte Modellvorstellungen zur AKR und daraus abgeleitete Mechanismen, welche zu einer Schädigung führen.

## 2.3 Schädigungsmechanismen und Modellvorstellungen

Das Zusammenspiel der alkalischen Porenlösung des Zementsteins und der reaktiven Bestandteile einer Gesteinskörnung führt zur Bildung von zusätzlichen Reaktionsprodukten und dadurch zu möglichen Schädigungen des Betongefüges. Der Schädigungsgrad hängt wesentlich von der Zusammensetzung sowie vom Ort und dem Zeitpunkt der Bildung der Reaktionsprodukte ab. Dies sind Faktoren, welche jedoch nicht einheitlich beschrieben sind [21].

Im Jahr 1955 veröffentlichen Powers und Steinour [37, 38] ihre Modellvorstellung zum Ablauf der AKR. Nach den Autoren reagieren die Alkalien mit amorphen silikatischen Bestandteilen der Gesteinskörnung. Der alkalische Angriff löst die Si-O-Si-Bindungen, so dass sich ein Alkali-Silica-Komplex bildet, welcher bei ausreichender Feuchtigkeit quellfähig ist. Die Anwesenheit von Calciumhydroxid führt zuvor zum Aufbau einer nicht quellfähigen Calcium-Alkali-Silica-Schicht um die Gesteinskörnung. Demnach kommt es zu einer Schädigung, wenn zu wenig oder kein Calcium mehr zur Verfügung steht.

Nach Locher und Sprung [39] bilden alkaliempfindliche Gesteinskörnungen mit Alkalihydroxid und Wasser Alkalisilikathydrate, welche auf Grund von osmotischen Vorgängen und erhöhten Volumina der Reaktionsprodukte innere Drücke aufbauen. Es wird  $\text{SiO}_2$  aus der Gesteinskörnung durch hydro-



xidhaltige Lösungen freigesetzt. In Verbindung mit Calciumhydroxid bilden sich dann entweder Calciumsilikathydrate oder es entstehen bei Anwesenheit von Alkalihydroxiden Alkalisilikathydrate. Letzteres kann ein Alkalitreiben im Beton verursachen. Die Autoren benennen Opal und poröse Flinte als alkaliempfindliche Gesteinskörnungen, wobei deren Korngröße sowie Menge und Lage im Beton entscheidend für den Schädigungsgrad der AKR sind.

Chatterji und andere [40, 41] stellen bei Untersuchungen unter der Einwirkung von Alkalisalzen fest, dass Alkali- und Hydroxidionen in die reaktive Gesteinskörnung eindringen. Während Calcium- und Sulfationen in der Porenlösung verbleiben, diffundieren Alkali- und Hydroxidionen weiter in die Gesteinskörnungsmatrix und brechen diese auf. Dabei wird  $\text{SiO}_2$  herausgelöst. Die Autoren führen die auftretenden Quelldrücke darauf zurück, dass mehr Ionen in die Gesteinskörnung diffundieren, als  $\text{SiO}_2$  herausgelöst wird.

Dent Glaser und Kataoka [42] behaupten, dass Hydroxidionen in die Gesteinskörnung diffundieren und dort die Si-O-Si-Bindungen aufbrechen. Darauf folgend bildet sich in Anwesenheit von Wasser und Calciumionen Gel, welches zuerst die vorhandenen Porenräume der Betonmatrix füllt und dann durch zu hohen Druck auf den Zementstein zu Rissen und Dehnungen des Betons führt. Die Autoren unterscheiden bei der Auflösung der Gesteinskörnung zwischen amorphem und kristallinem  $\text{SiO}_2$ . In der Abbildung 2 dargestellt, löst sich bei kristallinen Strukturen durch die verdichtete Anordnung des  $\text{SiO}_2$  dieses nur langsam und Lösereaktionen finden nur an der Oberfläche statt (A). Hingegen können bei Vorhandensein von porösem  $\text{SiO}_2$  die Hydroxid- und Alkaliionen in die Strukturen eindringen, dort die Si-O-Si-Bindungen aufbrechen, so dass diese schneller aufgelöst werden (B).

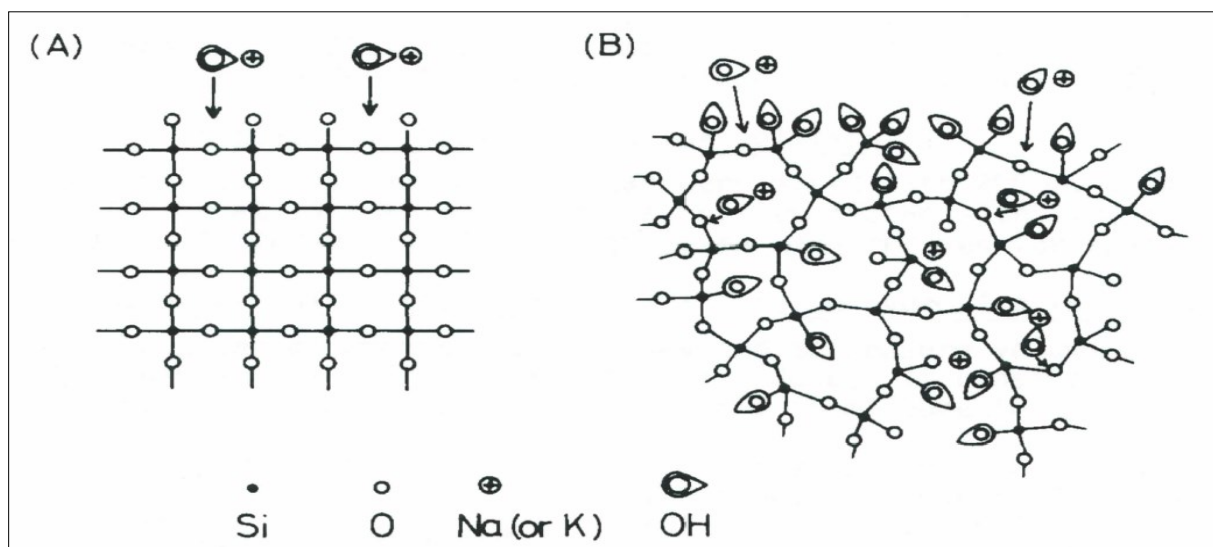


Abbildung 2: Auflösung von kristallinem und amorphem  $\text{SiO}_2$  [42]

Moranville-Regourd [43] folgt ebenfalls der Theorie von Dent Glaser und Kataoka [42] und nimmt für ihre numerischen Simulationen eine poröse Hülle um die Gesteinskörnung an, welche als Pufferraum für Reaktionsprodukte einer AKR dient. Nach Füllung dieser porösen Schicht kommt es zu Expansionsdrücken. Es treten demnach Dehnungen nur auf, wenn der Porenraum für das gebildete Gel nicht mehr ausreicht. Sie beschreibt einen Pessimumeffekt bezüglich des reaktiven  $\text{SiO}_2$ -Gehaltes der Gesteinskörnung, bei welchem wenig  $\text{SiO}_2$  vollständig mit Alkalien zu Gelen reagiert. Hingegen kann es bei hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehalten der Gesteinskörnung dazu kommen, dass vorhandenes  $\text{SiO}_2$  teilweise kein Gel bildet, weil nicht genügend Alkalien verfügbar sind.

In der Abbildung 3 ist der Reaktionsablauf über die Darstellung von silikatischen Strukturen von Gesteinskörnungen nach Wang und anderen [44] dargestellt. Die hier gezeigten  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder bestehen im Inneren aus Siliziumionen mit vier umgebenden Sauerstoffatomen. An der Oberfläche ist diese Tetraederform prinzipiell ebenfalls gegeben, jedoch haben sich  $\text{H}^+$ -Ionen an die Silikat-Tetraeder zum Ladungsausgleich angelagert (I), wodurch ein Austausch der  $\text{H}^+$ -Ionen durch entweder  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  oder  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen erfolgen kann (II). Mit einer ausreichenden  $\text{OH}^-$ -Konzentration in der Porenlösung werden die Si-O-Si-Brücken aufgebrochen und es lagern sich OH-Gruppen an die Siliziumatome sowie Alkaliionen an die Sauerstoffatome der Tetraeder an (III). Im weiteren Verlauf kommt es zum Austausch von  $\text{Na}^+$ - bzw.  $\text{K}^+$ -Ionen durch  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen, wodurch erneut Alkalihydroxide zum weiteren Fortgang einer AKR vorhanden sind (IV) [16, 45, 46, 47].

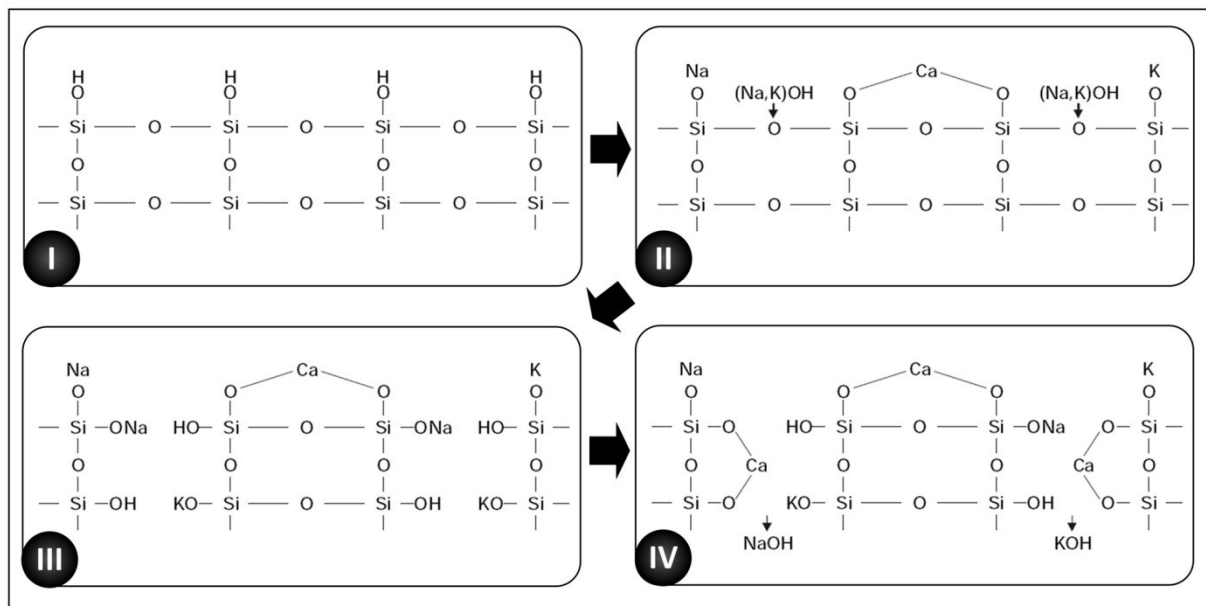


Abbildung 3: Mechanismus der AKR [44, 45]

Hou und andere [48] weisen ebenfalls auf die Gelbildung durch die Reaktion des  $\text{SiO}_2$  der Gesteinskörnung und den Alkali- und Hydroxidionen der Porenlösung hin. Die Autoren machen weiter auf abweichende Literaturangaben zur Gelzusammensetzung und dabei insbesondere auf den ungenügend verstandenen Einfluss des Calciums aufmerksam. Umfangreiche Untersuchungen der Reaktionsprodukte im Gesteinskörnungsbereich haben gezeigt, dass, solange  $\text{Ca(OH)}_2$  verfügbar ist, sich lediglich Calciumsilikathydrate mit den im Alkalischen gelösten Anteilen der Gesteinskörnung bilden und entsprechend keine Alkalisilikathydrate nachweisbar sind. Somit ist eine Gelbildung erst nach dem lokalen Verbrauch des  $\text{Ca(OH)}_2$  im Bereich der reaktiven Gesteinskörnung möglich. Durch die Verwendung von Microsilica und Metakaolin reduzieren Aquino und andere [49] die Dehnungen von Mörtelprismen in Mörtelversuchen. Die Autoren können bei einer fortschreitenden AKR einen zunehmenden Calciumgehalt und eine Abnahme der Siliziumkonzentration in den Alkalisilikathydraten nachweisen. Hingegen quantifiziert Mansfeld [50] durch seine Untersuchungen an Gelen einen notwendigen Calciumanteil, bei welchem die gebildeten Gele quellfähig sind. Der Calciumanteil sollte im Bereich von 5-30 M.-% liegen.

Nach Leemann und Lothenbach [31] führt viel Calcium zu geringen oder keinen Dehnungen, jedoch muss Calcium im Beton vorhanden sein, um überhaupt eine AKR zu initiieren. Gebildete Gelstrukturen enthalten nach Meinung der Autoren unter anderem Silizium-, Natrium-, Kalium- und Calciumio-

nen. Solche Strukturen können dann mit Wasser quellen. Sie unterscheiden früh und spät gebildete Gele. Wieker und andere [47] bestätigen die Zusammensetzung der Gele und deren zeitlich differenzierte Bildung. Die Autoren schreiben den Gelen jedoch eine schichtartige Struktur zu. Weiter postulieren sie eine Gelumbildung, bei der alkalireiche Gele mit noch vorhandenem  $\text{SiO}_2$  alkaliärmere Gele bilden. Die Autoren leiten aus ihren Untersuchungen ein AKR-Pessimum über das Verhältnis der Mengen von Alkalioxiden zu reaktionsfähigem  $\text{SiO}_2$  sowie der Kinetik der Bildungs- und Abbaugeschwindigkeit der Schichtsilikate ab. Steht demnach nicht genügend  $\text{SiO}_2$  zur Verfügung, bilden sich keine quellfähigen Schichtsilikate.

In einem Vorhaben des Forschungsinstitut der Zementindustrie [51] werden drei zeitlich aufeinanderfolgende Phasen mit verschiedenen Schwerpunkten zur Beschreibung von Gefügeveränderungen bei einer schädigenden AKR definiert. In der ersten Phase dominieren Hydrationsprozesse des Betons. Es sind steigende Ultraschallgeschwindigkeiten und Dehnungen zu messen. Darauf folgend überwiegt die einsetzende Rissbildung infolge der AKR, was sich durch verringerte Ultraschallgeschwindigkeiten und erhöhte Dehnungen widerspiegelt. In einer dritten Phase vermuten die Autoren eine bevorzugte Gelbildung und eine eventuelle Selbstheilung der entstandenen Risse und belegen ihre These mit flacher werdenden Dehnungskurven bei gleichzeitig leicht zunehmenden Ultraschallgeschwindigkeiten.

Im Folgenden sollen die Einflussfaktoren der Zementsteinmatrix und der Gesteinskörnung genauer beschrieben werden.

## 2.4 Einfluss der Zementsteinmatrix

Bei der Reaktion von Portlandzement mit Wasser bilden die Calciumsilikate der Hauptklinkerphasen Calciumsilikathydrate und Calciumhydroxid. Natrium- und Kaliumsulfat wird gelöst und reagiert mit Calciumhydroxid zu Calciumsulfat und Kalium- bzw. Natriumhydroxid [47]. Eine Aufstellung von [52] zeigt eine chemische Zusammensetzung von in Deutschland hergestellten Zementen, woraus hervorgeht, dass Portlandzemente mit einer Festigkeitsklasse von  $42,5 \text{ N/mm}^2$  einen um durchschnittlich vierfach höheren Kalium- als Natriumgehalt aufweisen. Durch Auspressversuche ist es möglich, die Porenlösung des Zementsteins bzw. des Betons zu untersuchen, um dadurch die Zusammensetzung der Porenlösung und deren zeitliche Veränderungen zu bestimmen. Derartige Untersuchungen belegen, dass die Hydroxid- und Alkaliionenkonzentration der Porenlösung einen wesentlichen Einfluss auf eine AKR haben und abhängig vom  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des verwendeten Zements sind [53, 54, 55]. Die Begrenzung des Alkali- oder Zementgehalts ist eine Möglichkeit zur Vermeidung einer schädigenden AKR im Beton [31]. Damgaard Jensen und andere [56] zeigen durch ihre Untersuchungen an Sanden, dass die Limitierung des Alkaligehaltes des Zements besonders bei externer Alkali-Zufuhr beispielsweise durch NaCl-Beaufschlagung keinen ausreichenden Schutz vor einer AKR darstellt. Für Gesteinskörnungsuntersuchungen werden meist Betone mit Zementen hergestellt, bei denen die Zementsteinporenlösung eine erhöhte Konzentration an Hydroxid- und Alkaliionen besitzt. Da die meisten eingesetzten Zemente nicht die Forderung der Prüfungsrichtlinien hinsichtlich einer ausreichenden Alkalität ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent:  $1,3 \pm 0,1 \text{ M.-%}$ ) erzielen, wurde durch eine Alkalihydroxidzugabe zum Anmachwasser die  $\text{OH}^-$ -Ionenkonzentration der Porenlösung erhöht. Jedoch verändern sich nach Böhm [53] dadurch auch die Konzentrationen der Alkali- und Sulfationen auf Grund der Ladungsbilanzen, was wiederum zu abweichenden Dehnungen führt. In neuerer Zeit wird anstelle von Alkalihydroxid Alkalisulfat eingesetzt.

Nach Hong [57] wird die Alkalikonzentration in der Porenlösung wesentlich durch die Einbindung der Alkalien in C-S-H-Phasen und deren Ca/Si-Verhältnis bestimmt. Durch die Abnahme des Quotienten aus dem Calcium- und Siliziumgehalt werden mehr Alkalien in C-S-H-Phasen eingebunden. Multon und andere [58] bestätigen, dass durch ein geringes Ca/Si-Verhältnis mehr Alkalien in C-S-H-Phasen eingebaut werden. Darüber hinaus weisen sie nach, dass die Zugabe von feinteiligem  $\text{SiO}_2$  die Konzentration der freien Alkalien in der Porenlösung senkt. Auch andere Autoren [59, 60] können durch den Einsatz von Microsilica mit einer Korngröße unter  $150\text{ }\mu\text{m}$  keine erhöhten Dehnungen feststellen. Schon im Jahre 1985 veröffentlicht Cheng-yi [61], dass durch den Einsatz von Microsilica der Natrium- bzw. Kaliumgehalt in C-S-H-Phasen erhöht und dadurch die Alkalität der Porenlösung gesenkt wird. Durch den anteiligen Austausch des Sandes durch feingemahlenes reaktives Gesteinskörnungsmehl erreichen Cyr und andere [62] eine Reduktion der Dehnungen bei Mörtelprismen. Jedoch gelingt den Autoren keine Korrelation zwischen der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung und der Effektivität des aus der Gesteinskörnung hergestellten Mehls.

Scholz und andere [63] gehen bei der Verwendung von Microsilica im Beton von Anfangsreaktionen aus, welche gleichzeitig zur Bildung von Calciumsilikathydrat- und Alkalisilikathydratphasen führen. Durch die C-S-H-Phasen wird zusätzlich die Festigkeit und Dichtigkeit erhöht. Urhan [64] bestätigt die Konkurrenzreaktion zwischen der stattfindenden AKR und der C-S-H-Bildung bei der Einbindung von  $\text{SiO}_2$ . Er beschreibt weiter, dass sich C-S-H-Phasen auf der Silikat-Oberfläche bilden und somit die  $\text{SiO}_2$ -Löslichkeit der Gesteinskörnung stoppen. Findet dieser Oberflächeneffekt nicht statt, bilden Alkalien und gelöstes  $\text{SiO}_2$  ein wasserhaltiges Alkali-Silikat-Gel. In [46] postulieren Garcia-Diaz und andere ebenfalls eine Einbindung von  $\text{SiO}_2$  in C-S-H-Phasen vor der Bildung von AKR-Gelen. Darüber hinaus gehen Garcia-Diaz und andere wie auch schon Urhan davon aus, dass  $\text{SiO}_2$  durch die Bildung von C-S-H-Phasen nicht quellfähig an der Oberfläche der Gesteinskörnungen gebunden wird [46, 64]. Das so gebundene  $\text{SiO}_2$  kann nicht schädigend wirken.

Hong [65] zeigt eine zusätzliche Bindungsfähigkeit für Alkalien durch C-S-H, wenn Aluminium anstelle von Silizium in C-S-H eingebunden wird. In dadurch gebildeten C-A-S-H-Phasen, welche eine hohe Bindungsfähigkeit von Alkalien haben, konnte ein messbar höheres Ca/Si-Verhältnis nachgewiesen werden. Dadurch zeigt sich ein Widerspruch zu der Veröffentlichung [57], wonach ein höheres Ca/Si-Verhältnis weniger Alkalien bindet, wobei festzuhalten ist, dass die vorangegangenen Untersuchungen nicht den Einfluss des Aluminiums berücksichtigen. Bei der Einbindung eines Aluminiumions ( $\text{Al}^{3+}$ ) anstelle eines Siliziumions ( $\text{Si}^{4+}$ ) können zusätzlich Natrium- oder Kaliumionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) in die C-A-S-H-Phasen eingebaut werden, um die überschüssige negative Ladung auszugleichen. Durch die Verwendung von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen zur Inhibierung einer AKR vermuten Ramlochan und andere [66] eine veränderte Zusammensetzung der C-S-H-Phasen. Dressler [67] bestätigt eine Vermeidung der AKR beim Einsatz von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen wie Metakaolin. Hierbei reduziert sich die Alkalität der Porenlösung durch die Einbindung von Alkaliionen in gebildete C-S-H- bzw. C-A-S-H-Phasen. Chappex und Scrivener [68] zeigen bei einem gleichbleibendem Ca/Si-Verhältnis in C-A-S-H-Phasen keine erhöhte Bindung von Alkalien. Sie vermuten einen anderen inhibierenden Mechanismus durch Aluminium, können ihn aber nicht benennen. In seiner Arbeit [69] konkretisiert Chappex die Wirkung des Aluminiums zum einen auf die schon erwähnte Veränderung der C-S-H-Zusammensetzung und zum anderen auf einen Effekt des Aluminiums auf der Oberfläche der Gesteinskörnung, wobei Aluminium die Auflösung von  $\text{SiO}_2$  verlangsamt. Pardal und andere [70] belegen bei Ihren Untersuchungen an synthetischen C-A-S-H-Phasen, dass bei der Bildung von C-A-S-H-Phasen mit steigenden Al/Si-Verhältnissen sich auch die Aluminiumkonzentrationen in den hergestellten Lösungen erhöhen. Scholz und andere [63] zeigen bei aluminatisch-silikatischen Zusatz-

stoffen, dass sich im alkalischen Medium vierfach koordiniertes Aluminium bildet, welches zusammen mit Silizium zu Alumosilikaten reagiert. Dabei können zusätzlich Natrium- und Kaliumionen bzw. Calciumionen eingebunden werden.

## 2.5 Einfluss von Gesteinskörnungen

Gesteinskörnungen sind mit etwa 70 Vol.-% der Hauptbestandteil des Betons. Die Gewinnung der Gesteinskörnung erfolgt meist lokal und preisgünstig. Zusammen mit dem Zement ergeben sie einen dauerhaften Baustoff [71]. Gesteinskörnungen beeinflussen die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Alkalien in der Porenlösung des Zementsteins, eine reaktive Gesteinskörnung und die Feuchtigkeit des Betons sind für eine AKR notwendig [72]. Während die Alkalität der Porenlösung des Zementsteins durch Auspressversuche hinreichend genau bestimmt werden kann, ist die Quantifizierung der Reaktivität einer Gesteinskörnung weitaus schwieriger.

### 2.5.1 Mineralogie und Petrografie

Die Mineralogie untersucht die Struktur und Bildung sowie die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kristallen und Mineralen. Sie wird unterteilt in die allgemeine und spezielle Mineralogie und ist ein Überbegriff für weitere Wissenschaftszweige wie die Kristallografie, Geochemie oder Lagerstättenkunde. Die Petrografie bzw. Gesteinskunde beschreibt als weiterer Teil der mineralogischen Wissenschaften den Stoffbestand, die strukturellen Eigenschaften, das Gefüge und das Vorkommen von Gesteinen, die aus gesteinsbildenden Mineralen aufgebaut sind [73, 74].

Mit Hilfe petrografischer Untersuchungen ist eine Beschreibung der Zusammensetzung der Gesteinskörnung möglich. Grattan-Bellew [75] empfiehlt stets solche Untersuchungen durchzuführen, obwohl allein daraus keine Aussagen über die Reaktivität der Gesteinskörnung möglich sind, da es manchmal nur 1-5 % der Gesteinskörnung sind, welche ein Maximum der Dehnungen ausmachen und dieser geringe Anteil bei einer petrografischen Analyse leicht übersehen werden kann.

Freyburg und Schliffkowitz [76] stellen ebenfalls fest, dass keine eindeutige Beurteilung einer Gesteinskörnung hinsichtlich einer zu erwartenden AKR durch den Kenntnisstand der Petrografie und der Mineralogie einer Gesteinskörnung möglich ist. In einem EU „Partner“ - Projekt [54] wird herausgestellt, dass besonders in Norwegen die meiste Akzeptanz und Erfahrung für die Untersuchung mittels Petrografie vorliegt, jedoch die mögliche Einstufung von Gesteinskörnungen durch petrografische Beschreibungen nicht überall anerkannt ist. Um eine petrografische Analyse durchzuführen, sind viel Erfahrung sowie regionales Wissen erforderlich. Weiter ist über die Petrografie keine Unterscheidung von langsam oder schnell reagierenden Gesteinskörnungen möglich. Es kann lediglich versucht werden, eine Einstufung in reaktiv oder unempfindlich vorzunehmen, wofür wie oben erwähnt die entsprechende Erfahrung und lokale Kenntnisse wichtig sind. Eine petrografische Beschreibung einer Gesteinskörnung ist nicht ausreichend, um eine genaue Einstufung hinsichtlich einer zu erwartenden AKR vorzunehmen. Wenk und andere [77] bestimmen mittels Transmissionselektronenmikroskopie die Fehlstellen im Quarz. Sie bestätigen, dass von den gestressten Quarzen eine erhöhte Löslichkeit und somit Reaktivität ausgeht, jedoch die angewendete Methode zu langwierig und aufwändig für Routineuntersuchungen ist. Auch Lukschová [78] stellt bei ihren petrografischen Untersuchungen an Mörtel- und Betonproben fest, dass die AKR-Empfindlichkeit einer quarzhaltigen Gesteinskörnung nicht ausschließlich vom Kristallinitätsgrad des Quarzes abhängig ist, sondern auch von der Größe der Quarzkörner. Untersuchungen von Hüniger und anderen [79] an verschiedenen Grau-

wacken zeigen, dass sich bei der Lagerung von Gesteinskörnungsbestandteilen in alkalischen Lösungen aus dem Quarz der höchste Anteil an  $\text{SiO}_2$  löst. Bei weiteren Mineralbestandteilen der Grauwacken wie Muskovit und Biotit sind neben den Mengen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  auch erhöhte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in der alkalischen Lösung festzustellen. Hüniger [80] verweist aber auch darauf, dass es keinen Zusammenhang zwischen dem Kristallinitätsindex des Quarzes der Grauwacken und deren Alkaliempfindlichkeit gibt.

Stark und andere [9] kombinieren petrografische Untersuchungen mit dem Mörtelschnelltest. Zu den petrografischen Untersuchungen zählen die Dünnschliffmikroskopie zur Beschreibung des Gefüges bzw. der Anordnung und Identifizierung von Gesteinsbestandteilen, die Phasenanalyse mittels XRD zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine sowie eine Einordnung in Stressquarztypen durch u.a. die Kornform oder die undulöse Auslöschung (teilweise Verdunkelung unter gekreuzten Polarisatoren beim Drehen des Minerals [81]). Besonders die Bestimmung der undulösen Auslöschung ist schwierig und führt zu abweichenden Ergebnissen [82]. Nach Grattan-Bellew [75] korreliert die undulöse Auslöschung nicht mit der Dehnung im 40 °C-Betonversuch und liefert unzuverlässige Aussagen.

Die Petrografie eignet sich zur Bestimmung von Gesteinskörnungsbestandteilen an Lockergesteinen wie z.B. einem Kies. Auf Grund von entstehungsspezifischen, regionalen Besonderheiten und zusätzlichen eiszeitlichen Überprägungen erfolgten bei solchen Lockersedimenten verschiedene Ablagerungsprozesse, die dazu führten, dass eine Gesteinskörnung (Kies) aus verschiedenen Gesteinsbestandteilen bestehen kann. Mit einer vereinfachten petrografischen Analyse nach DIN EN 932-3 [83] werden diese qualitativ und quantitativ ermittelt. Eine mineralogische Untersuchung eines Kiesel ist nur dann zielführend, wenn jedes einzelne Korn separat analysiert und für die Probe daraus der gewichtete Mittelwert gebildet wird.

Im Gegensatz zu einem Lockergestein kommt bei einem Festgestein der Mineralogie eine große Bedeutung zu, da hiermit tatsächlich die mineralogische Zusammensetzung eines Gesteins bestimmt werden kann. Es ist somit möglich, die Struktur und Chemie der gesteinsaufbauenden Minerale zu beschreiben. Eine zusätzliche Petrografie bei Festgesteinen wird durchgeführt, um beispielsweise Aussagen über Textureffekte oder Mineralanordnungen und -verwachsungen zu machen.

## 2.5.2 Löseversuche

### 2.5.2.1 Bestimmung von $\text{SiO}_2$

Neben der petrografischen Untersuchung schreibt die Alkali-Richtlinie [4] für schnell reagierende Gesteinskörnungen mit alkaliempfindlichen Bestandteilen wie Opalsandstein oder Flint weitere Prüfungen vor. Beim Flint wird die Rohdichte bestimmt, um dadurch den reaktionsfähigen Anteil des Flints zu bestimmen. Der Gehalt an Opalsandstein wird über einen Löseversuch in 90 °C-heißer Natriumhydroxidlösung anhand des Masseverlustes ermittelt. Durch die verschiedenen Anteile an Flint oder Opalsandstein wird über entsprechende Grenzwerte die Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit eingestuft. Diese Herangehensweise allein ist bei Gesteinskörnungen mit Teilen von Grauwacke, Rhyolith oder bestimmten Kiesen nicht anwendbar. Hier sind nach der Alkali-Richtlinie Prüfungen, wie das Schnellprüfverfahren und/ oder der 40 °C-Betonversuch, anzuwenden.

In den USA wird die chemische Methode ASTM C289 [84] zur Bestimmung der Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen als Löseversuch aufgeführt. Zur Durchführung werden 25 g von der auf 150-300 µm gemahlene Gesteinskörnung in 25 ml 1 M NaOH-Lösung bei 80 °C für 24 Stunden gelagert und anschließend die Konzentration an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{OH}^-$  in der Lösung bestimmt. Die Auswertung zur Bestimmung der Reaktivität der Gesteinskörnung erfolgt über ein Diagramm, bei welchem die Reduktion der Alkalität der Lauge in Abhängigkeit vom gelösten  $\text{SiO}_2$  abgetragen ist. In der Beschreibung der Methode ist die Eignung für spät reagierende Gesteinskörnungen wie mikrokristalline Quarze oder Grauwacken ausgeschlossen. Andere Autoren [7, 85] bestätigen, dass diese Methode nicht auf alle Gesteinskörnungen anwendbar ist und beurteilen diese als unbrauchbar zur Vorhersage von Dehnungen der Gesteinskörnungen im Beton. Auch Gao und andere [86] bestätigen durch ihre Untersuchungen, dass die Anwendung dieser Methode nicht zielführend ist und begründen ihre Meinung durch zu hohe Temperaturen beim Löseversuch und die damit von realen Betonbedingungen abweichende Auflösung von Mineralstrukturen der Gesteinskörnung. Grattan-Bellew [75] sieht ebenfalls eine Korrelation von chemischen Tests zu Betonversuchen problematisch. Besonders die alleinige Betrachtung von  $\text{SiO}_2$  reicht nicht zur Einstufung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung aus.

#### 2.5.2.2 Bestimmung von weiteren Bestandteilen

Allein durch die Bestimmung der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration bei Löseversuchen gelingt es nicht, bei der Gesamtheit der Gesteinskörnungen die Alkaliempfindlichkeit zu beurteilen. Grund dafür ist, dass sich aus den meist polymineralischen Gesteinskörnungen noch weitere Elemente zusätzlich zum Silizium herauslösen. Locati und andere [87] führen Löseversuche an Feldspäten in KOH- und NaOH-Lösungen in Anlehnung an [84] durch, um den Alkalieintrag der Feldspäte in alkalische Lösungen zu beschreiben. Aus einer typischen Zusammensetzung eines Kalifeldspates (z.B.  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) ist ersichtlich, dass Feldspäte neben den Alkalien noch Si- und Al-Bestandteile enthalten. Die Autoren belegen, dass neben  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{Na}_2\text{O}$  auch  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus den Feldspäten gelöst werden und die gemessenen Konzentrationen in der alkalischen Lösung von der Zusammensetzung der Minerale, jedoch wesentlich auch von deren Gefügeeigenschaften abhängig sind. Darüber hinaus beschreiben Lu und andere [88], dass die Freisetzung von Alkalien bei jeder Gesteinskörnung unterschiedlich ist und wesentlich von der Zusammensetzung der Lösung sowie der Lagerungstemperatur beeinflusst wird. Wang und andere [89] bestätigen die Lösung von Silikat- und Aluminationen aus Feldspäten und stellen dabei eine Korrelation zwischen dem pH-Wert der alkalischen Lösung und der Löslichkeit der Feldspäte fest. Die bei 25 °C durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  und  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  bei pH-Werten zwischen 13 und 14 die bevorzugt gebildeten Aluminat- und Silikationen in der alkalischen Lösung sind. Weiter sind bei Natron- oder Kalifeldspäten steigende Löslichkeiten bei zunehmenden pH-Werten festzustellen, wogegen speziell bei Nephelin, einem Feldspat mit einem geringen Anteil an  $\text{SiO}_2$ , die Löslichkeit im pH-Wert-Bereich zwischen 12 und 13 abnimmt. Der Alkalieintrag von Gesteinskörnungen in die Porenlösung des Betons verursacht eine erhöhte Schädigung infolge AKR [87, 89]. Wang und andere [90] belegen anhand von Mörtelschnelltests, dass durch die Verwendung von Feldspäten kombiniert mit nicht reaktiven Gesteinskörnungen die Dehnungen von Mörtelprismen bei geringen Alkaligehalten des verwendeten Zements ansteigen. Dieser Effekt nimmt jedoch bei höheren Alkaligehalten ab. Constantiner und Diamond [91] zeigen durch Auspressversuche an Mörtelproben, dass es durch den Alkalieintrag von Gesteinskörnungen zur Erhöhung der Alkalikonzentration der Porenlösung kommt.

Hünger [12, 80] stellt bei seinen Untersuchungen an den präkambrischen Grauwacken ebenfalls steuernde Einflüsse der AKR durch die Anwesenheit verschiedener Ionen in der alkalischen Lösung

fest. Der Autor beschreibt die AKR-Empfindlichkeit unterschiedlicher Grauwacken über Mechanismen der  $\text{SiO}_2$ -Freisetzungsrates von  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -liefernden Mineralen eines Korns. Dabei geht Hüngr [92, 93] von einer Anreicherung des Aluminiums auf der  $\text{SiO}_2$ -Oberfläche, der Bildung aluminosilikatischer Strukturen sowie der Fällung von Zeolith aus. In [79] beschreiben Hüngr und andere, dass die Bildung von Aluminosilikaten auf der Quarzoberfläche stattfindet. Hill [94] gelingt es, die Aluminosilikatbildung zu quantifizieren und eine Einstufung in Alkaliempfindlichkeitsklassen durch einen Löseversuch innerhalb von 14 Tagen vorzunehmen. Die Gesteinskörnung wird dazu gebrochen und jeweils 10 g der Korngruppen 0,25/0,5 mm, 1/2 mm und 4/8 mm in 100 mg 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C gelagert. Dabei weist der Autor nach, dass ein bestimmter Anteil des gelösten Siliziums durch das ebenfalls im Alkalischen aus der Gesteinskörnung herausgelöste Aluminium aluminosilikatisch gebunden wird und somit nicht mehr an einer AKR im Beton schädigend wirkt. Den verbleibenden Anteil an  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiO}_{2\text{üb}}$ ) definiert Hill [94] empirisch wie folgt:

$$\text{SiO}_{2\text{üb}} = \text{SiO}_{2\text{ges}} - 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}} \quad (4)$$

In der Gleichung (4) entsprechen die Werte  $\text{SiO}_{2\text{ges}}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}}$  den maximal gelösten Anteilen in mg/l in der Lösungsphase der Grauwacke nach 14 Tagen. Hill gelingt es, die Alkaliempfindlichkeit von präkambrischen Grauwacken zu bewerten. Die Korrelation der Enddehnung der Balken des 40 °C-Betonversuchs und des überschüssigen  $\text{SiO}_2$  in der Lösung zeigt die Abbildung 4. Hüngr und andere [95] weisen darauf hin, dass die Korrelation der Dehnung im 40 °C-Betonversuch und des überschüssigen  $\text{SiO}_2$  abhängig von der Gesteinsart ist.

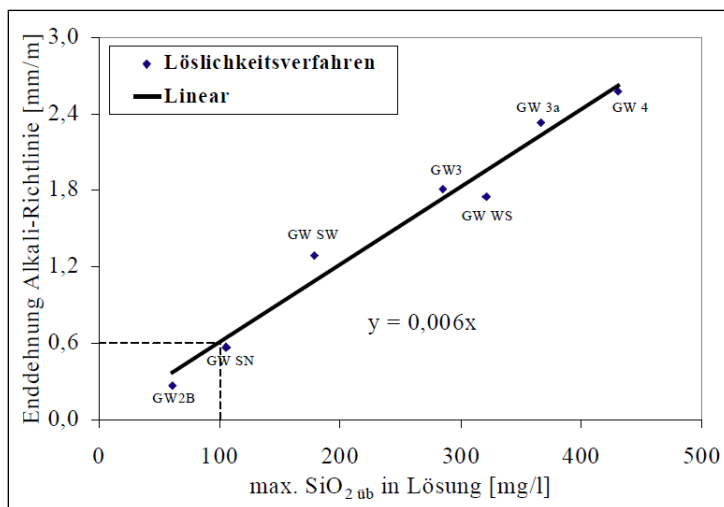


Abbildung 4: Abhängigkeit zwischen der Enddehnung der Balken des 40 °C-Betonversuchs und dem maximalen  $\text{SiO}_{2\text{üb}}$  in der Lösung mit präkambrischen Grauwacken [94]

Der präferierte Bindungsfaktor von Silizium zu Aluminium beträgt molar 1:1. Dies entspricht in etwa dem oxydischen Verhältnis 1:1,4 von Hill [94]. Die Bindung von Silizium durch Aluminium wird durch Untersuchungen zum Bildungsmechanismus von Molekularsieben durch Fahlke und andere [96] bestätigt.

Nach der Loewenstein-Regel [97] ist ein geringeres Bindungsverhältnis von Aluminium zu Silizium als 1:1 nicht möglich, da eine Verbindung von zwei Aluminiumatomen über ein Sauerstoffatom instabil ist.



Labrid und Duquerroix [98] stellen bei Löseversuchen von Sanden eine Inhibierung des Quarzes durch Aluminium fest, dabei beschreiben die Autoren die Bildung von Alumosilikaten im Verhältnis 1Al:2Si. Sie gehen davon aus, dass schon wenig Aluminium einen großen Einfluss auf die Löslichkeit von Silizium hat. Reduziert sich die Konzentration von Aluminium über die Lagerungsdauer, steigt die Löslichkeit von Silizium an. In einer weiterführenden Veröffentlichung bestätigt Labrid [99] die Wirkung von geringen Mengen von Aluminium, welche sich auf der Quarzoberfläche ablagern. Er stellt wiederholt die Bildung von Alumosilikaten heraus und beschreibt die Struktur als Analcim:  $\text{AlSi}_2\text{O}_6\text{Na} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , worin sich das experimentell gefundene Al/Si-Verhältnis von 1:2 ebenfalls zeigt.

Durch Untersuchungen von Oelkers und anderen [100] werden die Ergebnisse von Labrid [99] bestätigt. Oelkers und andere finden Strukturen bei der Auflösung von Muskovit mit einem Si/Al-Verhältnis von 2:1. Die so gebildeten Komplexe verhindern die weitere Auflösung von Muskovit. Die Autoren berichten weiterhin von einer schnelleren Auflösung des Aluminiumanteils im Vergleich zum Siliziumanteil. Oelkers und Gislason [101] beschreiben die reduzierte Löslichkeit von Silizium bei Anwesenheit von Aluminium und die Bildung von  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  aus gelöstem Aluminium. Nach Bickmore und anderen [102] lagert sich  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  auf der Quarzoberfläche ab, so dass durch die Adsorption von  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  die Auflösung des Quarzes verhindert wird. Zusätzlich beschreiben Saldi et al. [103] einen Einfluss von Metallprotonen auf die Löslichkeit von Alkalisilikathydraten.

Aus den dargestellten Untersuchungen lässt sich ableiten, dass bei Löseversuchen von Gesteinskörnungen, welche Aluminium in Lösung geben, neben den alumosilikatischen Komplexbildungen nach [98, 100, 12] noch weitere Mechanismen vom Aluminium ausgehen müssen, welche zur Beeinflussung einer AKR führen. Bei der Verwendung von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen beobachten Chappex und Scrivener [104], dass es beim Einsatz von Aluminium zu keiner Auflösung der Gesteinskörnung kommt. In [105] diskutiert Dove die verlangsamte Auflösung von Quarz durch Magnesium bzw. Aluminium und geht bei den Mechanismen von Oberflächeneffekten aus, dass Kationen, wie beispielsweise  $\text{Al}^{3+}$ , ursächlich für die Auflösungsbehinderung sind. Houston und andere [106] stellen mittels NMR-Untersuchungen ebenfalls fest, dass Aluminium die Auflösung von amorphen  $\text{SiO}_2$  auf der Oberfläche blockiert, in dem Aluminium in die Silikatstruktur eingebaut wird. Ab einem pH-Wert größer fünf beschränkt sich die Wirkung von Aluminium nicht nur auf Oberflächeneffekte, sondern bildet darüber hinaus alumosilikatische Strukturen. Im basischen Bereich ist demnach von einer dualen Wirkung des Aluminiums auszugehen:

- Oberflächeneffekt: Behinderung der Auflösung von  $\text{SiO}_2$
- Alumosilikatische Komplexbildung: Bindung von bereits gelöstem  $\text{SiO}_2$

Hagelia und Fernandes [107] untersuchen die Gelbildung bei granitischen und quarzitisches Gesteinskörnungen. Sie finden heraus, dass enthaltene Feldspäte und Glimmer den Ablauf der AKR beeinflussen, indem die Schichtsilikate als Katalysator für die Gelbildung fungieren. Weiter führt eine frühe Freisetzung von Si (und Al) aus der Gesteinskörnung zu einer veränderten Auflösung des Quarzes. Die Autoren weisen auf die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von Silikaten hin. Einige Autoren [64, 108, 109] beschreiben eine Temperaturabhängigkeit der  $\text{SiO}_2$ -Löslichkeit in der Weise, dass mit steigender Temperatur die  $\text{SiO}_2$ -Löslichkeit erwartungsgemäß zunimmt. Nach Dove und Rimstidt [110] hat neben der Temperaturerhöhung eine Alkali- bzw. pH-Wert-Erhöhung nur noch einen geringen Einfluss auf die Löslichkeit von Gesteinskörnungen. Weiterhin belegen die Autoren durch ihre Versuche, dass im pH-Wert-Bereich zwischen 2 und 12 Quarzoberflächen nur aufgelöst werden, wenn genügend negative Ladungsträger auf der Oberfläche vorhanden sind.

Nach Merkel und Planer-Friedrich [111] wird die Reaktionsgeschwindigkeit entscheidend durch die Konzentration der Ausgangsstoffe und der sich bildenden Produkte bestimmt. Die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen nimmt mit steigender Temperatur zu. Katalysatoren können die Reaktionen durch Erhöhung der Diffusion zusätzlich beschleunigen [112, 113]. Die Auflösung von Quarz ist abhängig von der Temperatur und vom pH-Wert [31, 114, 110]. Davies und Oberholster [115] stellen bei der Verifizierung ihres beschleunigten Tests durch Untersuchungen an AKR-geschädigten Betonbauwerken fest, dass die Reaktionsprodukte bei der Lagerung in NaOH- und KOH-Lösungen sehr ähnlich sind. Hou und andere [48] beschreiben ebenfalls gleichartige Reaktionen von Natrium und Kalium bei einer AKR, weisen jedoch beim Kalium eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit nach. Auch in [116] wird bei einem Vergleich von NaOH-, KOH- und LiOH-Lösungen in der KOH-Lösung die höchste Lösungsrate von Kieselgelen nachgewiesen. Weiter bilden sich in KOH-Lösungen höher polymerisierte Silikatanionen als in den Vergleichslösungen. Hübert und Hüniger [117] zeigen, dass die Löslichkeit der Gesteinskörnung beim Einsatz von Natriumhydroxid größer als bei Kaliumhydroxid ist. Ebenso weisen Lu und andere [118] bei vergleichenden Untersuchungen mit NaOH-, KOH- und LiOH-Lösungen der NaOH-Lösung die höchste Reaktivität bei der Auflösung von Gesteinskörnungen zu. Nach Leemann und Lothenbach [31, 119] verursachen Zemente mit gleichen  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalenten jedoch unterschiedlichen K/Na-Verhältnissen verschiedene Dehnungen im Beton und Mörtel. Weiterführende Untersuchungen der Gele und der Porenlösungen korrelieren mit der Erkenntnis, dass ein abweichendes K/Na-Verhältnis zu veränderten Reaktionen führt. Auch Wieker und andere [120] stellen bei Dehnungsuntersuchungen an gepressten Tabletten unterschiedliche Effekte bei Anwesenheit von Natrium- und Kaliumionen fest. Bei 87 % relativer Feuchte dehnen Tabletten aus Kaliumschichtsilikaten mit  $\text{SiO}_2$  schneller als Gemische mit Natrium, jedoch werden Kaliumschichtsilikate wesentlich schneller zu niedermolekularen Silikaten abgebaut, welche nur geringe Expansionen aufweisen. Bei Natriumschichtsilikaten führt nach den Autoren eine bessere Beständigkeit gegenüber hoher Feuchtigkeit zu höheren Dehnungswerten.

### 2.5.3 Physikalische Eigenschaften der Gesteinskörnung

Nach Marzouk und Langdon [121] führen höher reaktive Gesteinskörnungen zu größeren Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Betons als moderat reaktive Gesteinskörnungen. Doch nicht nur die chemischen sondern auch die physikalischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen verändern die Frisch- sowie Festbetoneigenschaften. Veränderte Betonparameter wirken sich unterschiedlich auf die Schädigung infolge einer AKR aus.

Die Rohdichte der eingesetzten Gesteinskörnung und die Reindichte des verwendeten Zements bestimmen wesentlich die Rohdichte des Betons. Normalbeton hat eine Trockenrohddichte von 2,0 bis 2,6  $\text{kg/dm}^3$  [122].

Einer der wichtigsten Kennwerte eines Betons ist der Wasserzementwert (w/z-Wert). Der Quotient aus dem wirksamen Wassergehalt und der Menge des Zementes wird bei der Entwicklung einer Betonrezeptur festgelegt und bedingt eine Vielzahl von Frisch- und Festbetonkennwerten wie beispielsweise die Konsistenz, den Luftporengehalt und die Festigkeit des Betons. Bei Normalbeton wird ein w/z-Wert von 0,4 für die Hydratation des Zements benötigt. Das darüber hinaus zur Verfügung stehende Überschusswasser bildet Kapillarporen. Ein höherer w/z-Wert führt zu einer geringeren Dichtigkeit und zur Minderung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons. Den Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und dem w/z-Wert für verschiedene Festigkeitsklassen des Zements zeigt die Abbildung 5.

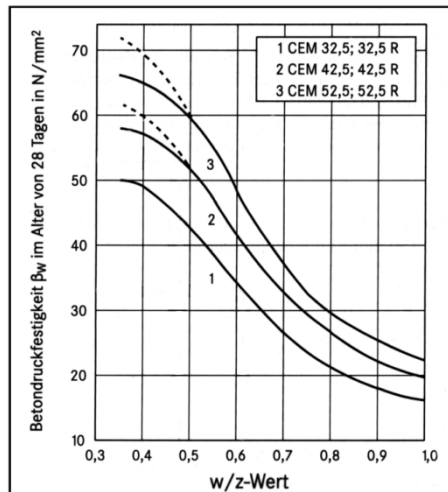


Abbildung 5: Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit vom w/z-Wert und der Festigkeitsklasse des Zements [123, 124]

Der wirksame Wassergehalt wird durch die Masse des Anmachwassers und durch die Feuchtigkeit der Gesteinskörnung bestimmt [125, 126]. An der Gesteinskörnung anhaftendes Wasser sowie wassergesättigte poröse Gesteinskörnungen erhöhen den w/z-Wert, wenn die Eigenfeuchte der Gesteinskörnungen unberücksichtigt bleibt. Die Kernfeuchte der Gesteinskörnung reagiert später mit unhydratisiertem Zement. Dies wird auch als innere bzw. autogene Nachbehandlung bezeichnet [71].

Wie viel Wasser eine Gesteinskörnung aufnehmen kann, wird durch die Wasseraufnahme nach 24 Stunden nach der DIN EN 1097-6 [127] bestimmt. Eine erhöhte Wasseraufnahme kann beim Einsatz von trockenen Gesteinskörnungen, wie es bei Laborversuchen üblich ist, zu einer Absenkung des w/z-Wertes und somit zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit und einem früheren Ansteifen des Betons führen. Ein sinkender w/z-Wert bedingt nach Lindgard und anderen [21]:

- eine Erhöhung der  $\text{OH}^-$ -Konzentration,
- die Erhöhung der Dichtigkeit des Betongefüges,
- eine Minderung der relativen Feuchte und eine dadurch erhöhte innere Trockenheit.

Die Erhöhung der  $\text{OH}^-$ -Konzentration und eine gleichzeitig zunehmende Dichtigkeit des Gefüges führen nach Lindgard und anderen [21] zu einer steigenden Schädigung des Betongefüges infolge einer AKR. Laut Forschungen des VDZ [51] führt eine zunehmende Gefügedichte nicht zwangsläufig zu einer verstärkten AKR im Beton. Dressler und andere [128] gehen von einer verringerten Porosität des Zementsteins durch einen sinkenden w/z-Wert und einer dadurch reduzierten AKR aus. Die Untersuchungen von Bonzel und anderen [129] lassen eine Verstärkung der AKR-Schäden eher durch einen steigenden w/z-Wert vermuten. Ursächlich dafür könnten die sinkende Betonfestigkeit und der damit geringere Widerstand der Betonmatrix gegen innere Gefügestörungen sein. Jedoch zeigen Betone mit höheren Festigkeiten mehr Schäden als geringer feste Betone. Weiter gehen die Autoren von einer Erhöhung der Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung durch einen abnehmenden w/z-Wert aus, wodurch Reaktionen mit der Gesteinskörnung schneller und früher stattfinden. Möglicherweise kommt es jedoch zu diesem Zeitpunkt zu geringeren Schäden, da der Beton noch verformbar ist. Im Gegensatz dazu führen die Autoren an, dass der verminderte w/z-Wert zu einem schnelleren Hydratationsverlauf und damit zu höheren Anfangsfestigkeiten führt, was wiederum die Zeitspanne für eine unschädlich stattfindende AKR im frühen Betongefüge vermindert. Bollmann [130] bestätigt die Erhöhung der Alkali- und Hydroxidionenkonzentration durch einen abnehmenden w/z-Wert.

Nach Dahme [131] ist mit steigendem w/z-Wert eine Zunahme der Porosität des Betons verbunden und dadurch mit erhöhten Diffusionskoeffizienten zu rechnen. Bier [132] bestätigt deutlich erhöhte Transportkoeffizienten durch einen zunehmenden w/z-Wert. Eine Erhöhung des Luftporengehalts des Betons führt nach Bonzel und anderen [129] jedoch nicht zu einer verringerten AKR-Schädigung, wie es bei Frost-Tausalz-Beanspruchung durch die Unterbrechung der Kapillaren der Fall ist. Hingegen wird von anderen Autoren [42, 43] der Porenraum um die Gesteinskörnung als Ablagerungsort für gebildete Gelstrukturen beschrieben, wodurch eine Minderung der AKR angenommen wird. Gao und andere [133] beschreiben Gelablagerungen in den Rissen von Gesteinskörnungen, welche keine weiteren Schädigungen verursachen und bestärken somit, dass Gefügestörungen in Gesteinskörnungen als Pufferraum für Gele fungieren.

Bachmann und andere [134, 135] betrachten die offene Porosität der Gesteinskörnung als Ablagerungsraum. Die offene Porosität wird aus der Kombination der DIN EN 1097-6 [127] zur Bestimmung der Wasseraufnahme von Gesteinskörnungen und der DIN EN 1936 [136] ermittelt. Bachmann [137] stellt heraus, dass die Höhe der offenen Porosität der Gesteinskörnung mit der Dehnung der entsprechenden Balken beim 40 °C-Betonversuch korreliert. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 6 dargestellt.

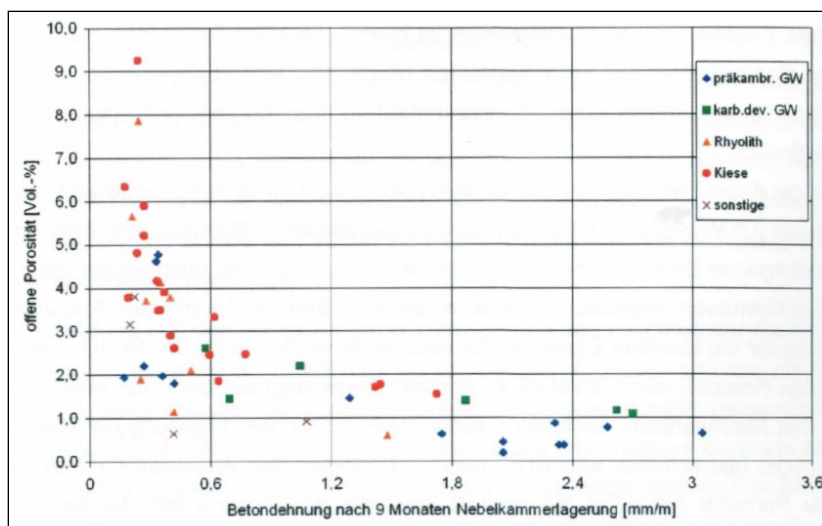


Abbildung 6: Gegenüberstellung der offenen Porosität von Gesteinskörnungen und der Dehnung der Balken des 40 °C-Betonversuchs [137]

Weiter beschreibt Bachmann [137] die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung mit dem SP-AKR-Wert nach der Gleichung (5), welcher aus dem überschüssigen  $\text{SiO}_2$ -Anteil ( $\text{SiO}_{2\text{ü}}$  nach Hill [94]) und der offenen Porosität der Gesteinskörnung berechnet wird.

$$\text{SP-AKR-Wert} = \text{SiO}_{2\text{ü}} / 100 - \text{offene Porosität} + 1 \quad (5)$$

Der SP-AKR-Wert ist ein Maß für die zu erwartende Schädigung durch die Gesteinskörnung, wobei ein SP-AKR-Wert  $< 0$  anzeigt, dass die Gesteinskörnung alkaliunempfindlich ist. Gesteinskörnungen mit einem SP-AKR-Wert  $> 0$  führen im 40 °C-Betonversuch zu Dehnungen der Balken bzw. zu Rissbildungen am Würfel.

Nach Grattan-Bellew [75] bietet die Bestimmung des Wasseranspruchs jedoch keine Grundlage, die Porosität einer Gesteinskörnung zu bestimmen. Eine andere Möglichkeit, den Gesamtporenraum einer Gesteinskörnung zu ermitteln, ist durch die Porositätsbestimmung mittels Quecksilberdruckpo-

rosimetrie gegeben. Mit dieser Methode sind die Ergebnisse auf Grund der geringen Probenmengen und auch durch Mehrfachversuche bei heterogenen Gesteinskörnungen nicht repräsentativ. Darüber hinaus sind diese Untersuchungen kostenintensiv [82].

Neben der Porosität haben weitere Eigenschaften der Gesteinskörnungen wie die Korngröße und -form einen Einfluss auf die Schädigung des Betons. Gao und andere [133] weisen auf Unterschiede in den Dehnungen durch die Variation des Verhältnisses von Probekörperabmessung zu Korngröße der Gesteinskörnung hin. Einem Bericht vom Forschungsinstitut der Zementindustrie [51] ist ebenfalls zu entnehmen, dass abweichende Dehnungen und Rissbreiten auf unterschiedliche Probekörpergeometrien zurückzuführen sind. Multon und andere [138] erkennen bei ihren Untersuchungen eine zunehmende Dehnung der Probekörper bei Verwendung größerer Korngruppen. Nach Weber und anderen [71] ist eine gedrungene Kornform mit geschlossener Oberfläche für eine gute Kraftverteilung sowie einen geringen Zementleimverbrauch vorteilhaft. Grund dafür ist die geringere Oberfläche im Vergleich zu ungünstigeren Kornformen. Durch die erhöhte Oberfläche benötigen gebrochene Gesteinskörnungen etwa 5-10 M.-% mehr Wasser als Rundkörner. Eine dementsprechend rauere Oberfläche und eckigere Kornform bieten jedoch eine bessere Kornverzahnung sowie erhöhte Kontaktzonen und wirken sich positiv auf die Druckfestigkeit aus. Um den Wasserbedarf von Gesteinskörnungen abzuschätzen, wird die Körnungsziffer (k-Wert) der Gesteinskörnung bestimmt. Betoneigenschaften wie Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit und Festigkeit sind sehr stark von der Sieblinie und der Korngrößenverteilung abhängig [139].

Die Geschwindigkeit von heterogenen Reaktionen nimmt mit der Vergrößerung der Oberfläche von Festkörpern zu [113]. Grattan-Bellew [75] stellt einen großen Einfluss der Oberfläche und Kornbeschaffenheit bei Löslichkeitsuntersuchungen fest, wobei vom Autor auf die schwierige Bestimmung dieser Parameter hingewiesen wird. Brandt [140] stellt bei seinen Untersuchungen zur Kinetik heterogener Schädigungsmechanismen an Schichtsilikatoberflächen heraus, dass die Oberflächen von Mineralen keineswegs atomar glatt wie bei idealen Oberflächen sind, sondern Fehlstellen und Vertiefungen haben. Weiter belegen Bosbach und andere [141], dass die reaktive Mineraloberfläche sich während der Auflösungsprozesse verändert und somit Unterschiede zu der anfänglichen Oberfläche ausweist. In diesem Zusammenhang legen Bickmore und andere [142] dar, dass die Oberflächen von Mineralen bei Löseversuchen rauer oder aber glatter werden können. Die Oberfläche ist somit nicht als konstant anzunehmen.

Mielich [143] untersucht mit der Bruchzähigkeit und dem Elastizitätsmodul weitere Materialkennwerte von Gesteinskörnungen. Durchgeführte Löseversuche zeigen, dass ein hoher pH-Wert von 14, wie er bei Prüfverfahren der Alkali-Richtlinie vorkommt, zur Entfestigung der Gesteinskörnung durch deren Auflösung führt und sich somit die Bruchzähigkeit und der Elastizitätsmodul der Gesteinskörnung reduzieren. Die veränderten mechanischen Eigenschaften der Gesteinskörnung beeinflussen den Elastizitätsmodul des Betons und somit den Ablauf einer AKR. Durch den Einsatz der Mikrofokus-Röntgen 3D-Computertomografie gelingt es Weise und anderen [144], vor allem das Mikrogefüge im Beton und somit die räumliche Visualisierung von Rissbildungen sowohl im Beton als auch in den Gesteinskörnungen auf Mikroebene zu erfassen und nachzuweisen.

## 2.6 Zusammenfassung des Wissenstandes

Die Literaturübersicht macht deutlich, dass es eine Vielzahl von Veröffentlichungen zum Mechanismus einer AKR im Beton gibt. Weiterhin zeigt die Fülle an Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der AKR-Empfindlichkeit von Gesteinskörnungen und die vermehrten Publikationen über die Evaluierung der Testverfahren, wie schwierig es ist, Gesteinskörnungen hinsichtlich ihres AKR-Gefahrenpotentials im Beton zielsicher zu beschreiben und in möglichst kurzen Testlaufzeiten zu quantifizieren. Schließlich zeigt sich, dass viele bestehende Prüfverfahren Probleme bei der Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung aufweisen, was besonders auf den teilweise ungeklärten Einfluss der Lagerungsbedingungen wie Temperatur und Feuchte bzw. das Brechen der Gesteinskörnungen für die Laborversuche zurückzuführen ist.

Die Prozesse im Beton durch den Einsatz von Flint und Opalsandstein sind weitgehend geklärt. Diese schnell reagierenden Gesteinskörnungen können durch den Teil 2 der Alkali-Richtlinie zielsicher und schnell klassifiziert werden. Die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von später reagierenden Gesteinskörnungen erfolgt über Prüfverfahren nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie, wobei die Einstufung mit dem Schnellprüfverfahren zu unsicher ist.

Die Modelltheorien stimmen bezüglich der Bildung von quellfähigen Reaktionsprodukten durch die vorhandenen Alkalien aus dem Zementstein oder von außen eindringenden Alkalien und dem sich lösendem  $\text{SiO}_2$  aus der Gesteinskörnung überein. Der Einfluss von Calcium scheint nicht vollständig geklärt zu sein. Es ist davon auszugehen, dass Calcium für die Bildung von quellfähigen Reaktionsprodukten zur Verfügung stehen muss. Eine Quantifizierung ist jedoch schwierig.

Insbesondere die Untersuchungen der Porenlösung des Zementsteins bzw. des Betons durch Auspressversuche ermöglichen eine genauere Beschreibung des Einflusses des Zementsteins. Dadurch kann die Bildung von Alkalihydroxiden hinreichend nachgewiesen und auch die teilweise Einbindung von Alkalien sowie  $\text{SiO}_2$  in C-S-H-Phasen gezeigt werden. Durch die Beimengung von aluminiumhaltigen Feinstoffen bilden sich C-A-S-H-Phasen, welche zur Inhibierung einer AKR beitragen. Ebenso wird der Beitrag des Aluminiums bei Löseversuchen von Gesteinskörnungen diskutiert, wobei zwei Richtungen verfolgt werden. Zum einen wird die Sorption von Aluminium auf der Gesteinskörnungsoberfläche mit der dadurch verbundenen Hemmung der Auflösung beschrieben und andererseits ist die Bindung von  $\text{SiO}_2$  durch die Bildung von Alumosilikaten im alkalischen Milieu nachgewiesen. Somit bietet die alleinige Betrachtung des gelösten  $\text{SiO}_2$  keine Möglichkeit, die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung zu definieren. Mehrere Veröffentlichungen berichten über einen starken Einfluss der Temperatur sowie des pH-Wertes bei Löseversuchen.

Weitere Forschungen zur Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen stellen heraus, dass die petrografische und mineralogische Begutachtung nur zusätzliche Hinweise für die Einstufung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung zulassen. Diese Methoden sind entweder zu aufwändig oder geben keine eindeutigen Aussagen über die Reaktivität einer Gesteinskörnung. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass physikalische Eigenschaften der Gesteinskörnungen den Frisch- und Festbeton und dadurch eine AKR im Beton beeinflussen können.

Die folgenden Aussagen lassen sich aus der Literaturübersicht zusammenfassend ableiten:

- 1) Es existiert derzeit kein Schnellprüfverfahren, welches die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen außer bei Opalsandsteinen und Flinten sicher bewerten kann.
- 2) Eine Kalibrierung von Schnellprüfverfahren muss an den Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs bzw. des 38 °C-Concrete Prism Tests erfolgen.
- 3) Die bestehenden Schnellprüfverfahren weichen in existentiellen Punkten vom 40 °C-Betonversuch ab. Dies sind beispielsweise das versuchsbedingte Brechen der Gesteinskörnungen und/ oder die erhöhten Temperaturen bei der Hydratation mit gleichbleibenden bzw. aufdotierten Alkaligehalten der Zemente oder hoch alkalischen Lagerungslösungen.
- 4) Die Einflüsse der Zementsteinmatrix und des Betongefüges auf den Ablauf der AKR werden widersprüchlich beschrieben.
- 5) Die Reaktion von silikatischen Bestandteilen der Gesteinskörnung mit den Hydroxid- und Alkaliionen der Porenlösung des Zementsteins bedingen eine AKR. Teilweise werden dabei die Gelbildung und der dadurch mögliche Quelldruck kontrovers diskutiert. Besonders die Rolle des Calciums ist bisher nicht abschließend geklärt.
- 6) Die inhibierende Wirkung von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen ist zunehmend durch Forschungsergebnisse belegt.
- 7) In alkalischen Lösungen steuert Aluminium die Freisetzung von  $\text{SiO}_2$ -haltigen Bestandteilen aus der Gesteinskörnung. Dabei werden Oberflächeneffekte und alumosilikatische Komplexbildungen nachgewiesen.
- 8) Aus Bestandteilen der Gesteinskörnung, wie Feldspäten und Glimmer, kann sich Aluminium herauslösen und ähnlich wie aluminiumhaltige Zusatzstoffe zur Vermeidung einer schädigenden AKR beitragen.

### 3 Ziele und Vorgehensweise

Die vorangegangenen Ausführungen belegen, dass es bisher nicht gelungen ist, alle Faktoren einer AKR und deren Wechselwirkung zu modellieren, um die Eignung einer Gesteinskörnung im dauerhaften Beton hinsichtlich einer AKR vorherzusagen. Bisherige Vorgehensweisen untersuchen an „Modellbetonen oder -mörteln“ unter „Modellbedingungen“ die Dehnungen bzw. Rissbildungen als Kriterien für die Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen. Besonders problematisch sind dabei die Bemühungen, die Testverfahren durch die Temperaturerhöhungen, das Brechen der Gesteinskörnungen, die Zufuhr von Alkalien von außen und/ oder die andauernde Durchfeuchtung zu beschleunigen. Die Folgen sind Fehleinschätzungen der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen durch zum Beispiel Auslaugungen der Probekörper, Zersetzungen des Ettringits bzw. veränderte Oberflächen durch das Brechen.

Die Zielstellung der Arbeit ist es daher, den Beitrag der Gesteinskörnung zur AKR im Beton zielsicher zu beschreiben und darüber hinaus die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen zu quantifizieren, um somit die zu erwartende Schädigung durch die Gesteinskörnung detaillierter als bisher klassifizieren zu können. Dabei soll auf langwierige und aufwändige Betonversuche genauso wie auf Mörtelschnelltests verzichtet werden. Das Brechen der Gesteinskörnungen und der Einsatz von Zement sind bei der Prüfung ebenfalls auszuschließen. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei nicht in der Prüfung möglichst vieler Gesteinskörnungen sondern im Verständnis der Auflösungsprozesse der Gesteinskörnungen in hochalkalischen Lösungen ( $\text{pH} \geq 13$ ) bei unterschiedlichen Reaktionsbedingungen.

In einem ersten Schritt dieser Arbeit werden vier Gesteinskörnungen in den Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm mit dem 40 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie [4] geprüft. Wie der Literaturrecherche zu entnehmen ist, gilt dieser Test national wie auch international als zuverlässigstes Verfahren zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen. Folgend werden das Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie [4] sowie petrografische und mineralogische Untersuchungen angewendet, um die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs mit diesen Methoden nachzustellen. Anschließend werden Löseversuche mit den Lieferkörnungen der Gesteinskörnungen bei 40 °C und 1,0 M KOH-Lösung durchgeführt. In folgenden Arbeitsschritten werden diese Reaktionen beschleunigt, ohne dabei grundlegend ablaufende Prozesse der AKR verändern zu wollen. Weiter wird über formalkinetische Auswertungen der Lösekurven die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen unter Einbeziehung der Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs erfasst und dadurch der Beitrag der Gesteinskörnung zur AKR beschrieben. Vertiefend belegen weitere Beispiele die Anwendbarkeit der Versuchsbedingungen und festgelegten Untersuchungskriterien. Abschließend wird diese Methodik auf die Verwendung von Zusatzstoffen erweitert, um den Einfluss von Zusatzstoffen auf die Löslichkeit der Gesteinskörnung in hochalkalischen Lösungen zu beschreiben.



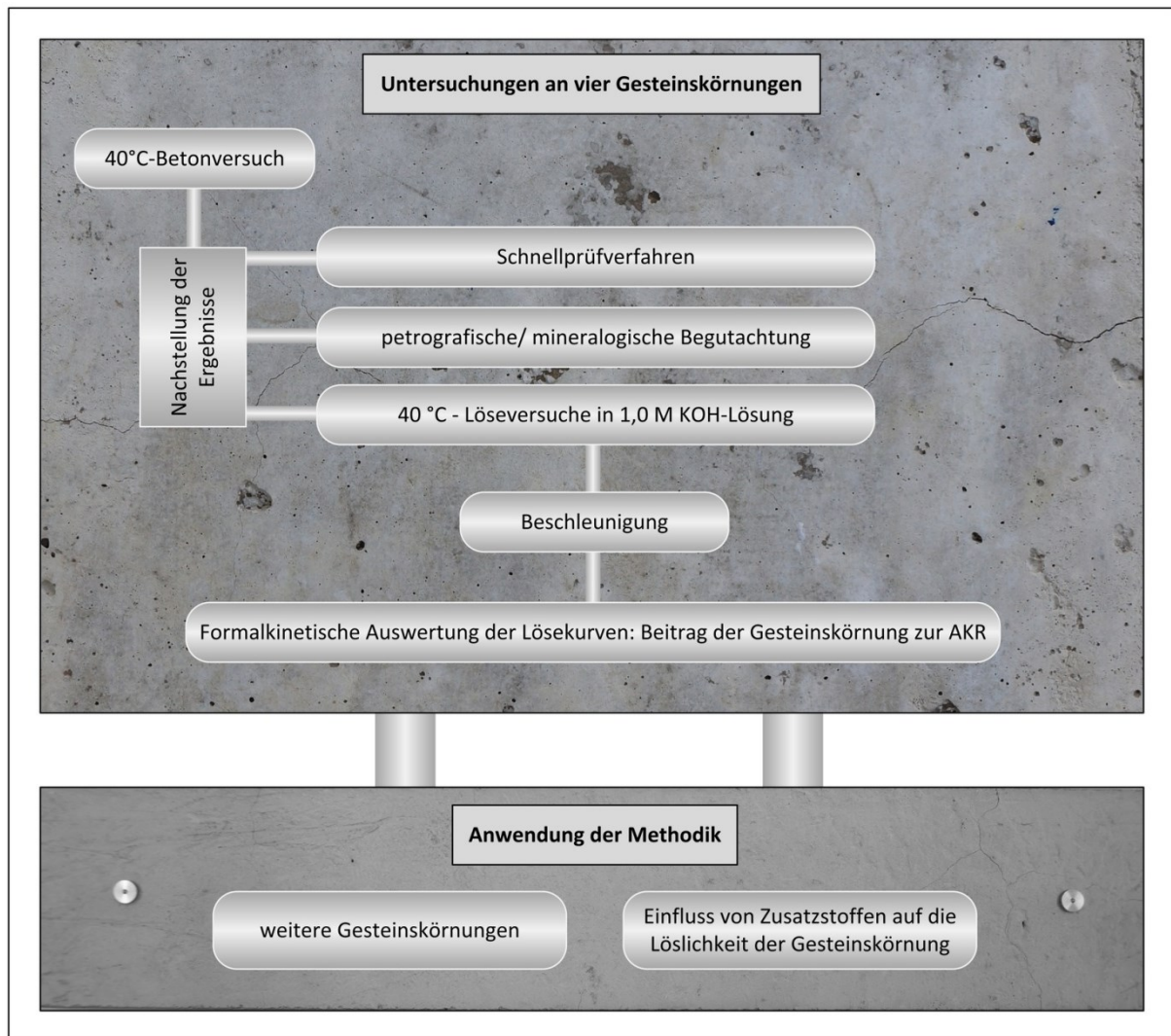


Abbildung 7: Aufbau der Arbeit

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Ausgangsmaterialien und deren Charakterisierung

#### 4.1.1 Zement

Als Zement wird ein Prüfzement nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie [4] verwendet. Der Portlandzement CEM I 32,5 R hat einen  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,09 M.-%. Durch Zugabe von 0,605 M.-% Kaliumsulfat zum Anmachwasser ist der Zement auf ein  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,3 M.-% dotiert. Die physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften des Zements sind in der Tabelle 1 bis Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften - Prüfzement CEM I 32,5 R [Lieferangaben 2011 VDZ e.V.]

Dichte	Spezifische Oberfläche	Druckfestigkeit - 2 d	Druckfestigkeit - 28 d
3,13 g/cm <sup>3</sup>	3450 cm <sup>2</sup> /g	21,1 N/mm <sup>2</sup>	47,5 N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung in M.-% - Prüfzement CEM I 32,5 R [Lieferangaben 2011 VDZ e.V.]

Glühverlust	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>
2,02	61,31	20,02	4,98	3,57	3,24	3,07	0,25	0,22	1,39	0,17	1,09

Tabelle 3: Mineralogische Zusammensetzung in M.-% - Prüfzement CEM I 32,5 R [Lieferangaben 2011 VDZ e.V.]

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A
55,4	16,7	10,0	7,9

#### 4.1.2 Gesteinskörnungen

Für die Betonversuche wird ein Sand 0/2 mm als feine Gesteinskörnung verwendet. Ergebnisse von Ideker und anderen [24] belegen, dass es einen Einfluss des Sandes auf die AKR gibt, welcher zu Veränderungen der Prüfergebnisse führt. Durch die Verwendung eines einheitlichen Sandes im gesamten Prüfprogramm ist von einer gleichbleibenden Beeinflussung durch den Sand auszugehen. Eine weiterführende Beurteilung des Sandes ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Als grobe Gesteinskörnungen werden zwei Kiese, ein Rhyolith und eine Grauwacke in den Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm verwendet. Im Folgenden werden die Gesteinskörnungen weiter beschrieben.

An den Lieferkörnungen der Gesteinskörnungen werden die Rohdichte und die Wasseraufnahme nach 24 Stunden ( $\text{WA}_{24}$ ) über das Pyknometerverfahren nach DIN EN 1097-6 [127] bestimmt. Die ermittelten Kennwerte der Gesteinskörnungen sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Kennwerte - Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 (GK 1 bis GK 4)

Kennwert	GK 1 – Kies		GK 2 - Grauwacke		GK 3 – Rhyolith		GK 4 – Kies	
	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm
Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,57	2,58	2,67	2,68	2,58	2,59	2,59	2,63
WA <sub>24</sub> [M.-%]	0,96	0,77	0,78	0,50	0,81	0,77	1,85	1,37

Nach der DIN EN 933-1 [145] werden die k-Werte der einzelnen Lieferkörnungen ermittelt. Die Ergebnisse der Siebanalysen sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Siebrückstände in M.-% - Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Prüfsiebe	GK 1 2/8 mm	GK 1 8/16 mm	GK 2 2/8 mm	GK 2 8/16 mm	GK 3 2/8 mm	GK 3 8/16 mm	GK 4 2/8 mm	GK 4 8/16 mm
16 mm	0,00	16,60	0,00	1,80	0,00	1,35	0,00	11,00
8 mm	3,35	97,75	5,50	81,45	6,65	87,75	1,35	78,15
4 mm	58,10	99,85	77,10	98,50	79,60	98,75	43,45	97,00
2 mm	92,65	99,90	96,70	99,45	97,50	99,30	90,90	99,25
1 mm	97,70	99,90	99,05	99,45	99,40	99,50	98,50	99,75
0,5 mm	99,45	99,90	99,30	99,45	99,55	99,55	99,15	99,80
0,25 mm	99,85	99,90	99,35	99,45	99,60	99,55	99,45	99,80
k-Wert [-]	4,51	6,14	4,77	5,80	4,82	5,86	4,33	5,85

In einem zweiten Teil des Versuchsprogramms werden neun grobe Gesteinskörnungen GK A bis GK K in den Untersuchungen verwendet, welche ausschließlich über die Löslichkeit im Alkalischen beschrieben werden sollen.

Die verwendeten Gesteinskörnungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 17248 BG und des AiF-Kooperationsprojektes KF0191904SU8 zur Verfügung gestellt.

#### 4.1.2.1 Petrografische Beschreibung der Kiese

Für die Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 und 4 werden petrografische Untersuchungen nach der DIN EN 932-3 [83] von der Prüfgesellschaft für Straßen- und Tiefbau mbH & Co. KG (PST-Bernburg) durchgeführt. Die Ergebnisse der Geröllanalysen sind in der Tabelle 6 gezeigt.

Tabelle 6: Petrografische Zusammensetzung in M.-% - Korngruppe 8/16 mm der Kiese (Gesteinskörnung 1 und 4) - Zuordnung der Geröllkomponenten nach DIN EN 932-3 [83]

Geröllkomponenten	Gesteinskörnung 1	Gesteinskörnung 4
Quarz	60,2	1,3
Kieselschiefer	2,8	12,0
Quarzit	3,7	1,3
Grauwacke	0,6	8,5
übrige paläozoische Sedimente	4,1	60,3
Sandstein	0,5	0,6
Kalkstein	0,1	1,4
Rhyolith, Andesite, Porphyre, basische Vulkanite	10,4	8,0
Kristallin	14,5	6,4
Feuerstein	3,2	0,2
stark eisenschüssiger Sandstein	-	0,1

Die Gesteinskörnung 1 besteht zu 60 M.-% aus Quarz. Weitere Hauptstandteile sind kristalline Geröllkomponenten (15 M.-%) und Rhyolithe (10 M.-%). Kieselschiefer, Quarzite, Flinte und übrige paläozoische Sedimente stellen in Summe ca. 15 M.-% der Gesteinskörnung 1 dar. Bei der Gesteinskörnung 4 sind die übrigen paläozoischen Sedimente mit 60 M.-% vertreten. Kieselschiefer (12 M.-%), Grauwacke (9 M.-%) und kristalline Komponenten (6 M.-%) sowie die Gruppe der Rhyolithe, Andesite und basischen Vulkanite (8 M.-%) sind weitere Gemeingeteile. Quarze und Quarzite sind bei der Gesteinskörnung 4 kaum zu finden. Teile der Geröllkomponenten wie Kieselschiefer, Rhyolithe oder Andesite sind zum Teil stark verwittert. Die Gesteinskörnungen 1 und 4 sind in ihrer petrografischen Zusammensetzung sehr unterschiedlich.

#### 4.1.2.2 Mineralogische Beschreibung der Gesteinskörnungen

Die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 wurden mittels Röntgenbeugungsanalyse (X-Ray Diffraction, XRD) untersucht. In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse der mineralogischen Analyse zusammengestellt.

Tabelle 7: Mineralogische Zusammensetzung in M.-% - Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Mineral	Mineralgruppe	GK 1		GK 2		GK 3		GK 4	
		2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm
Biotit	Glimmer	4	2	15	13	10	8	11	4
Chlorit	Vier-Schichtsilikat	3	6	14	15	-	-	15	18
Mikroklin	Feldspat	10	11	5	2	12	9	3	6
Plagioklas		7	8	28	34	29	31	17	26
Sanidin		-	-	-	-	25	27	-	-
Quarz		76	73	34	32	25	26	48	36
Calcit	Kalkstein	-	-	5	4	-	-	5	10

Die Gesteinskörnung 1 hat mit über 70 M.-% einen sehr hohen Anteil an Quarz. Weitere Minerale der Gesteinskörnung 1 sind Mikroklin (10-11 M.-%) und Plagioklas (7-8 M.-%) sowie in geringen Anteilen vorhandener Chlorit (3-6 M.-%) und Biotit (2-4 M.-%). Durch den Gesamtanteil von Quarz und Feldspäten von über 90 M.-% ist ein hoher Anteil an Gesamt-SiO<sub>2</sub> in der Gesteinskörnung 1 vorhanden. Betrachtet man vergleichend den anderen Kies (Gesteinskörnung 4), besteht dieser zu ca. 50 M.-% aus Schichtsilikaten und Feldspäten. Die summierten Anteile an Chlorit und Biotit mit 22-26 M.-% sowie Plagioklas und Mikroklin mit 20-32 M.-% sind höher als bei der Gesteinskörnung 1. Quarz macht hier nur die Hälfte der Mineralzusammensetzung aus. Hinzu kommt Calcit in Anteilen zwischen 5-10 M.-%.

Nach den Ergebnissen der petrografischen Untersuchungen besteht die Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 1 aus ca. 63 M.-% Quarz und Quarzit. Der röntgenografisch nachgewiesene Quarzgehalt beträgt ca. 73 M.-%. Die sich ergebende Differenz des Quarzgehaltes von 10 M.-% ist in den petrografisch ermittelten Geröllkomponenten Grauwacke, Sedimente, Sandsteine, Rhyolithe, Andesite, Vulkanite und Kristallin enthalten.

Bei der Gesteinskörnung 2 (Grauwacke) ist Quarz zu etwa einem Drittel enthalten. Auch die Schichtsilikate Biotit und Chlorit sind zu ca. 30 M.-% vertreten. Die Feldspäte sind durch einen Plagioklasanteil von 28-34 M.-% geprägt. Es sind geringe Mengen an Calcit nachweisbar. Die Zusammensetzung ist typisch für eine Grauwacke. Die Gesteinskörnung 3 (Rhyolith) ist ein magmatisches Gestein. Rhyolithe besitzen ein porphyrtartiges Gefüge. Bei der Gesteinskörnung 3 sind die Quarzkörner sichtbar in einer feinkristallinen Matrix eingebettet. Der Quarzgehalt ist mit ca. 25 M.-% relativ gering. Der Anteil der Feldspäte beträgt in Summe ca. 65 M.-%. Ebenfalls in der Matrix vorhanden sind ca. 10 M.-% Glimmer.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse in der Tabelle 7 deutliche Unterschiede in den Mineralbestandteilen der Gesteinskörnungen zeigen. Mitunter treten auch Schwankungen der mineralogischen Zusammensetzung zwischen den Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der jeweiligen Gesteinskörnung auf.

### 4.1.3 Zusatzstoffe

Als Zusatzstoffe werden Microsilica und Metakaolin verwendet. Microsilica besteht zu 95 M.-% aus amorphem  $\text{SiO}_2$ . Der amorphe Anteil von Metakaolin beträgt 65 M.-%. Der Rest von Metakaolin besteht hauptsächlich aus ca. 5 M.-% Quarz und ca. 25 M.-% nicht umgewandeltem Kaolinit. Die chemischen Zusammensetzungen der Zusatzstoffe sind in der Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung in M.-% - Microsilica und Metakaolin [Hersteller-Lieferangaben]

Zusatzstoff	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
Microsilica	94,7	0,9	0,2	0,8	1,0	-	2,4	-
Metakaolin	51,1	45,5	0,1	1,0	0,1	1,9	0,2	0,1

## 4.2 Untersuchungsmethoden und Analyseverfahren

### 4.2.1 Auspressversuche am Zementstein

Auspressversuche dienen der Gewinnung der im Zementstein enthaltenen Porenlösung. Untersuchungen von Zementsteinen werden durchgeführt, um das komplexe System eines Betons zu entkoppeln und die Komponente des Zementsteins unabhängig von der Gesteinskörnung zu betrachten.

Es wird eine Zementpaste aus Portlandzement nach 4.1.1 mit einem w/z-Wert von 0,45 hergestellt und bei 40 °C in einer luftdicht verschlossenen PE-Flasche gelagert. Nach einer Lagerungsdauer von 90 Tagen wird durch Auspressen des Zementsteins mit einem Druck von 320 MPa die Porenlösung der erhärteten Probe gewonnen und durch einen 0,2  $\mu\text{m}$ -Membranfilter filtriert. Die Porenlösung wird anschließend durch acidimetrische Titration, ICP-OES und Ionenchromatografie analysiert.

### 4.2.2 Mineralogische Analyse der Gesteinskörnungen mittels Röntgenbeugung

Die mineralogische Untersuchung der Gesteinskörnungen erfolgt an den Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm. Zur Vorbereitung werden die Proben auf kleiner 40  $\mu\text{m}$  zermahlen und auf einen Kunststoffträger aufgebracht. Für die Röntgenbeugungsanalyse kommt ein Diffraktometer der Firma Seifert (XRD 3000 TT) zur Anwendung. Die quantitative Auswertung zur Bestimmung der kristallinen Phasen erfolgt über das Programm Autoquan der Firma Seifert.

### 4.2.3 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung

Der 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung gilt in Deutschland und der entsprechend vergleichbare 38 °C-Concrete Prism Test international als das Prüfverfahren, welches zur Einstufung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen am besten geeignet ist [4, 22, 7, 23, 24, 25].

Für die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung werden drei Balken (100 x 100 x 500 mm) und ein Würfel (300 x 300 x 300 mm) mit dem Portlandzement (400 kg/m<sup>3</sup>) nach 4.1.1 hergestellt. Die zu prüfenden Gesteinskörnungen sind bei einem Größtkorn von 16 mm in den Lieferkörnungen 2/8 mm (40 Vol.-%) und 8/16 mm (30 Vol.-%) zu verwenden. Als feine Gesteinskörnung wird ein AKR-unbedenklicher Natursand 0/2 mm (30 Vol.-%) eingesetzt. Es ist ein w/z-Wert von 0,45 vorgegeben.

Einen Tag nach der Herstellung der Probekörper sind diese auszuschalen und die Balken an zwei gegenüberliegenden Längsseiten mit Messzapfen zu versehen. Die anschließende Nullmessung erfolgt bei 20 °C. Danach werden die Probekörper bei 40 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 99 % in der Nebelkammer gelagert. Regelmäßige Messungen der Längenänderung der Balken werden ohne Abkühlen der Probekörper durchgeführt, so dass bei möglichen Dehnungen stets der Temperatur- und Feuchteinfluss von 0,2-0,4 mm/m, differierend zur Nullmessung, beachtet werden muss.

Für eine Einstufung der Gesteinskörnung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse EI-S darf die Dehnung der Balken 0,6 mm/m nach 9 Monaten Lagerungszeit nicht überschreiten. Gleichzeitig muss die Rissbreite am Würfel unter 0,2 mm liegen. Sind diese Kriterien nicht erfüllt, ist die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung mit EIII-S zu bewerten. Daraus folgend sind erforderliche Maßnahmen entsprechend des Zementgehaltes und der Feuchtigkeitsklasse für den Beton zu treffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Lagerungszeit abweichend von der Alkali-Richtlinie um drei Monate auf ein Jahr verlängert, um spät reagierende Gesteinskörnungen zu erkennen und eine Vergleichbarkeit zu internationalen Forschungen und Prüfergebnissen herzustellen. Beim 38 °C-Concrete Prism Test ist eine Lagerungsdauer von einem Jahr vorgeschrieben [54, 28].

#### 4.2.4 Schnellprüfverfahren

Das Schnellprüfverfahren wird zur kurzfristigen Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen verwendet [4]. Das Verfahren erlaubt die Prüfung von Lieferkörnungen oder Mischungen von Lieferkörnungen mit Korngrößen  $\geq 2$  mm. Für gebrochene Festgesteine erfolgt die Einstufung durch die Prüfung der Korngruppe 8/16 mm. Die Gesteinskörnung ist zu brechen, auf die Korngruppen 0,125-4,0 mm entsprechend der Tabelle 3.5 der Alkali-Richtlinie [4] zu sieben, zu waschen und anschließend bis zur Massekonstanz zu trocknen. Mit dem Portlandzement nach 4.1.1, einem Gesteinskörnung/Zement-Verhältnis von 2,25:1 und einem w/z-Wert von 0,47 werden drei Mörtelprismen (40 x 40 x 160 mm) für die Dehnungsmessungen nach DIN EN 196-1 [146] hergestellt. Zur Bestimmung der Längenänderung sind jeweils an den Stirnseiten der Prismen Messzapfen einzumörteln. 24 Stunden nach der Herstellung werden die Prismen ausgeschalt und in einem Wasserbad bei 80 °C gelagert. Nach weiteren 24 Stunden erfolgen die Nullmessung und die anschließende Lagerung in 1,0 M NaOH-Lösung bei 80 °C. Nach 13 Tagen ist die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung zu beurteilen. Bei einer Dehnung  $\leq 1,0$  mm/m ist die Gesteinskörnung mit EI-S zu bewerten. Ab einem Wert größer 1,0 mm/m ist keine Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse durch das Schnellprüfverfahren möglich. Die Gesteinskörnung muss dann für die Einstufung der Alkaliempfindlichkeit durch den 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung geprüft werden.

#### 4.2.5 BTU-SP-Test

Der BTU-SP-Test (BTU-Löse- und Porositäts-Test) wurde von Bachmann und anderen [134] als alternatives Verfahren zu den im Teil 3 der Alkali-Richtlinie [4] aufgeführten Prüfungen entwickelt. Über die direkte Prüfung am Korn erfolgt eine mögliche Einstufung in Alkaliempfindlichkeitsklassen über die maximal gelösten Anteile an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  innerhalb von 14 Tagen. Dieses Verfahren ist aber noch nicht zugelassen.

Für die Analyse werden die Lieferkörnungen der Gesteinskörnungen mittels Backenbrecher gebrochen und auf die Korngruppen 0,25/0,5 mm, 1/2 mm und 4/8 mm gesiebt, gewaschen und anschlie-

ßend bis zur Massekonstanz getrocknet. 10 g jeder Korngruppe werden in 100 g 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C in HDPE-Flaschen bis zu 14 Tagen gelagert. Im 2-Tages-Intervall erfolgt die Analyse einer Probe auf  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in der flüssigen Phase. Für jeden Analysetermin ist eine Probe herzustellen. Nach Gleichung (6) ermittelt sich der nach Hill [94] verbleibende Anteil an  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiO}_{2\text{üb}}$ ), welcher nicht durch das Aluminium alumosilikatisch gebunden wird und somit an einer AKR im Beton schädigend wirkt.

$$\text{SiO}_{2\text{üb}} = \text{SiO}_{2\text{ges}} - 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}} \quad (6)$$

Neben dem überschüssigen  $\text{SiO}_2$  wird für die Einstufung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung die offene Porosität aus der Kombination der DIN EN 1097-6 [127] und der DIN EN 1936 [136] bestimmt. Nach Bachmann [137] hat die offene Porosität einer Gesteinskörnung einen wesentlichen Einfluss auf deren Alkaliempfindlichkeit im Beton. Eine zunehmende offene Porosität reduziert die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung und die Dehnung der Balken im 40 °C-Betonversuch. Die Einstufung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung erfolgt nach Abbildung 8. Gesteinskörnungen mit einem  $\text{SiO}_2$ -Überschuss in der Lösung von unter 100 mg/l sind unabhängig von der offenen Porosität als nicht reaktiv zu bewerten. Liegt der  $\text{SiO}_2$ -Überschuss in der Lösung über 400 mg/l, hat die offene Porosität ebenfalls keinen Einfluss und die Gesteinskörnung ist alkaliempfindlich. Zwischen 100 mg/l und 400 mg/l erfolgt die Einstufung der Alkaliempfindlichkeit in Abhängigkeit von der offenen Porosität.

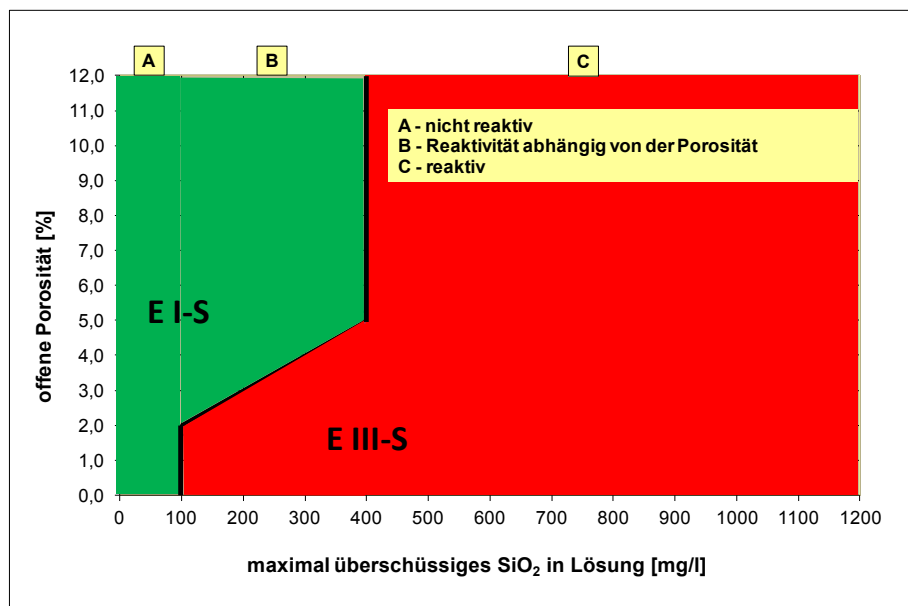


Abbildung 8: BTU-SP-Test - Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen [135]

#### 4.2.6 Löseversuche

Für die Löseversuche ist die Lieferkörnung der Gesteinskörnung zu waschen und anschließend bis zur Massekonstanz bei 105 °C zu trocknen. 90 g der Gesteinskörnung werden mit 900 g KOH-Lösung in einer luftdicht verschlossenen Kunststoffflasche mit einem Nennvolumen von 1 l stehend gelagert. Die Versuchsbedingungen wie die Lagerungsdauer und -temperatur, die Konzentration der KOH-Lösung sowie die Messintervalle sind entsprechend der Untersuchungsziele variabel angepasst. Zu jedem Messtermin sind jeweils 3 ml der Lösung zu entnehmen und durch einen 0,2 µm-Membranfilter zu filtrieren. Anschließend werden die  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der



Probe mittels ICP-OES-Methode bestimmt. Die Abbildung 9 zeigt ein Organigramm des Versuchsablaufs.

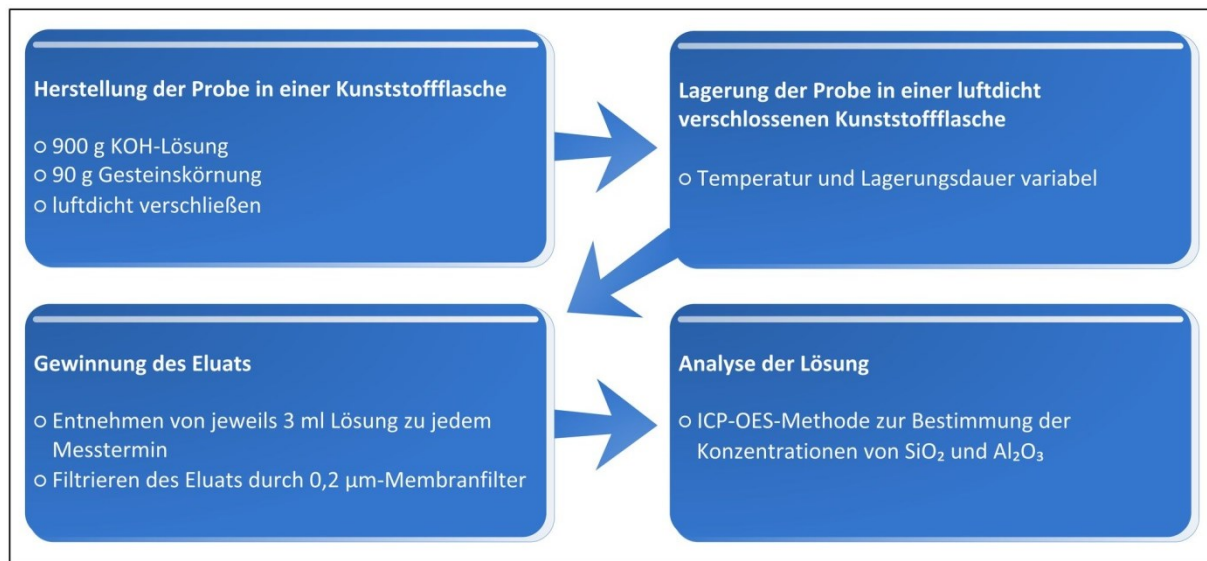


Abbildung 9: Ablauf des Löseversuchs

Das Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:10 sowie die Verwendung der KOH-Lösung wurden aus der Beschreibung der Löseuntersuchungen von Hill [94] und Hüniger [80] übernommen (siehe 4.2.5).

Eine wesentliche Abweichung zu anderen Löseverfahren wie beispielsweise dem BTU-SP-Test oder der ASTM C289 ist eine deutlich größere Probenmenge, wodurch eine erhöhte Homogenität bei weiterhin gutem Handling der Probengefäße erreicht wird. Eine weitere Vervielfachung der Einwaagen führt zu keinen nennenswerten Veränderungen der Ergebnisse, was Untersuchungen an erhöhten Einwaagen gezeigt haben. Es erschwert lediglich die Durchführung der Methode durch die Handhabung der größeren Probengefäße. Weiterhin wird die für den Versuch ungebrochene Gesteinskörnung in der originalen Korngruppe eingesetzt, um vergleichbare Bedingungen zum 40 °C-Betonversuch zu erreichen, aber auch die Forderung zur Prüfung der originalen Lieferkörnung [7] zu erfüllen. Das Brechen von Gesteinskörnungen für Laborversuche führt zu veränderten Eigenschaften der Gesteinskörnung [21]. Besonders beim Brechen von Lockergesteinen werden neue Oberflächen geschaffen, welche so im Beton nicht vorkommen.

Die Korngruppen der Gesteinskörnungen werden einzeln und nicht in Mischung geprüft. Das macht mitunter eine Wichtung der Einzelergebnisse notwendig, um Vergleiche mit anderen Verfahren zu ermöglichen, bei denen die Korngruppen der Gesteinskörnungen in Mischung untersucht werden. Folliard und andere [22] berichten über verfälschte Ergebnisse durch die Prüfung der Korngruppen in Mischung, wogegen andere Autoren [27] eine gemischte Prüfung mitunter empfehlen, jedoch auch nur um eine Korrelation zum 40 °C-Betonversuch zu schaffen.

Ein weiterer Vorteil bei dieser Methode besteht darin, dass zu jedem beliebigen Zeitpunkt eine Messung der Probe durch die Analyse weniger Milliliter der Lagerungslösung erfolgen kann, ohne dabei die Lagerung und den Versuch zu beenden. Dadurch sind detaillierte Betrachtungen der Konzentrationsveränderungen in der Lösung zu jedem Messtermin über frei wählbare Zeiträume möglich. Andere Löseversuche erfordern meist Mehrfachansätze einer Gesteinskörnung zur Beurteilung der Konzentrationsentwicklung der gelösten Anteile über die Zeit. Bei der vorgestellten Methode wird fort-

laufend ein und dieselbe Probe untersucht. Somit sind auch formalkinetische Betrachtungen der ermittelten Konzentrationen sehr gut möglich. Dennoch sind Mehrfachansätze einer Gesteinskörnung zu empfehlen, um einerseits die Wiederholbarkeit der Ergebnisse nachzuweisen und andererseits eine eventuelle Inhomogenität der Gesteinskörnung durch eine Mittelwertbildung von mehr als drei Einzelbestimmungen auszugleichen. Der mittlere prozentuale Fehler der Bestimmung der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in Mehrfachansätzen beträgt  $\pm 10\%$ , überwiegend hervorgerufen durch Inhomogenitäten der untersuchten Gesteinskörnungen. Die Analyse der alkalischen Lösung weist einen mittleren prozentualen Fehler von  $\pm 1\%$  auf.

#### 4.2.7 Optische Emissionsspektrometernmethode mit induktiv gekoppeltem Plasma

Die Analysen der ausgepressten Porenlösung des Zementsteins und der Proben der Löseversuche werden durch die ICP-OES-Methode (Optische Emissionsspektrometernmethode mit induktiv gekoppeltem Plasma) durchgeführt. Es wird das iCAP 6300 ICP-OES DUAL View der Firma Thermo Fisher Scientific verwendet.

#### 4.2.8 Acidimetrische Titration

Die Hydroxidionenkonzentration der ausgepressten Porenlösung des Zementsteins wird durch Titration mit  $0,1\text{ M HCL}$  mit potentiometrischer Endpunkterkennung bestimmt. Es wird der Titrator T50 der Firma Mettler Toledo verwendet.

#### 4.2.9 Ionenchromatografie

Die Sulfationenkonzentration der ausgepressten Porenlösung des Zementsteins wird ionenchromatografisch bestimmt. Nach dem Verdünnen der Probe erfolgt die Analyse mit einem Ionenchromatografen der Firma Dionex.

#### 4.2.10 $\mu$ -Röntgen 3D-Computertomografie

Einzelne Körner von Gesteinskörnungen werden bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung mittels  $\mu$ -Röntgen 3D-Computertomografie (3D-CT) räumlich erfasst, um darüber die inneren und äußeren Oberflächen der Körner möglichst genau zu bestimmen. Dazu werden die Gesteinskörner mit Röntgenstrahlen aus mehreren Betrachtungswinkeln durchstrahlt. Durch die Ermittlung der radiografischen Dichteunterschiede kann aus den Einzelaufnahmen ein räumliches Abbild der Gesteinskörner ermittelt werden [147]. Die für diese Arbeit verwendete  $\mu$ -Röntgen 3D-CT-Anlage gewährleistet eine maximale Auflösung von  $10\text{ }\mu\text{m}$ .

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Beton- und Mörtelprüfungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gesteinskörnungsuntersuchungen in Anlehnung an die Alkali-Richtlinie [4] dargestellt. Es werden vier Gesteinskörnungen in den Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm untersucht, welche sich in Bezug auf die Gesteinsart und dem Reaktionsverhalten im 40 °C-Betonversuch deutlich unterscheiden.

Entsprechend der Alkali-Richtlinie [148, 149, 4] sind die Grauwacke (Gesteinskörnung 2) und der Rhyolith (Gesteinskörnung 3) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie zu prüfen. Die Kiese (Gesteinskörnungen 1 und 4) sind nach Teil 2 und entsprechend der Lage der Gewinnungsorte auch nach Teil 3 zu prüfen. Nach Teil 2 der Alkali-Richtlinie sind die Gesteinskörnungen 1 und 4 als E I-O/ E I-OF einzustufen. Bei den Untersuchungen ist kein Opalsandstein festgestellt worden. Die Flinthohdichte der Gesteinskörnung 1 beträgt 2,53 g/cm<sup>3</sup>. Nach der petrografischen Geröllanalyse hat die Gesteinskörnung 1 einen Flintanteil von 3,2 M.-%. Der Anteil an reaktionsfähigem Flint beträgt nach Teil 2 der Alkali-Richtlinie 0,31 M.-%. Bei der Gesteinskörnung 4 entfällt die Überprüfung der Flinthohdichte entsprechend des geringen Anteils von 0,15 M.-%.

#### 5.1.1 40 °C-Betonversuch

In Deutschland gilt der 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung als das Referenzverfahren [4]. Auch international wird dieser Test als „bestes“ Prüfverfahren benannt [22, 7, 23, 24]. In der Abbildung 10 sind die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs nach Alkali-Richtlinie dargestellt. Es werden die Dehnungen der Balken und die Rissbreiten der Würfel über eine Lagerungsdauer von 360 Tagen gemessen. Somit wird die Messung der Probekörper abweichend von der Richtlinie um 90 Tage auf ein Jahr verlängert, um eventuell spät reagierende Gesteinskörnungen mit erfassen zu können. In der Abbildung 10 sind die Dehnungen über die Zeit abgetragen. Die ermittelten Rissbreiten sind nach 270 sowie 360 Tagen gezeigt.

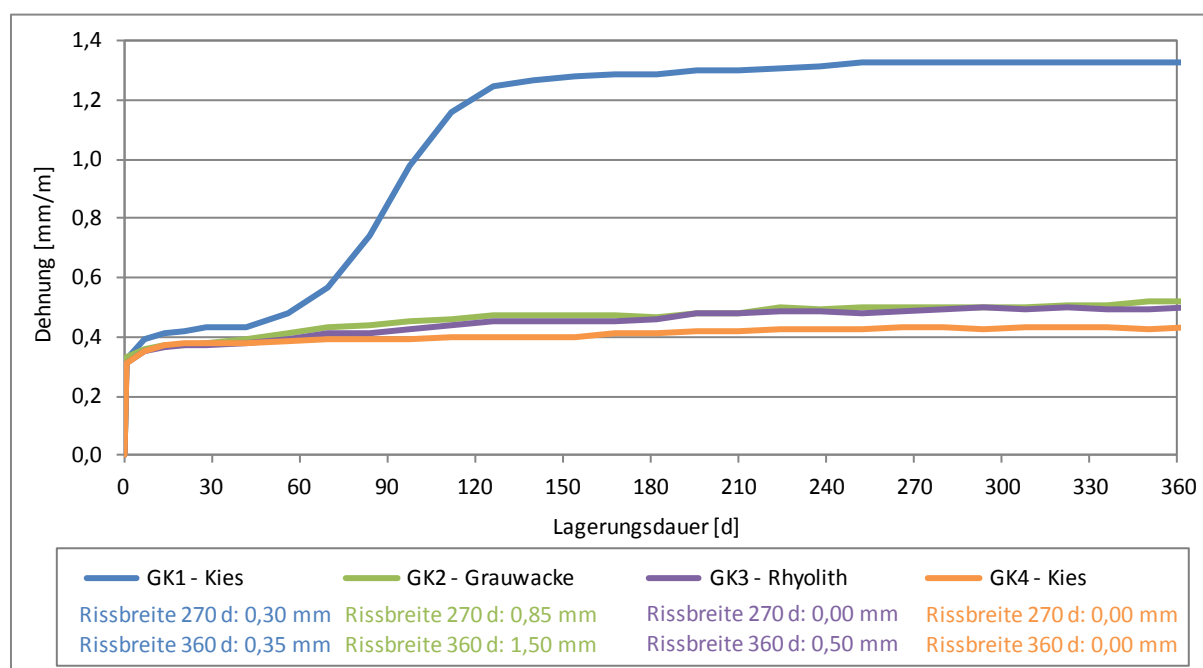


Abbildung 10: Ergebnisse - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Die vier ausgewählten Gesteinskörnungen sind in der Reaktivität im 40 °C-Betonversuch und ebenso in ihrer Zuordnung zu den Gesteinsarten Kies, Grauwacke und Rhyolith sehr unterschiedlich. Zuerst ist auffällig, dass nur der mit der Gesteinskörnung 1 hergestellte Beton eine signifikante Dehnung über dem Grenzwert von 0,6 mm/m aufweist. Diese liegt mit 1,33 mm/m deutlich im empfindlichen Bereich. Die Rissbreite ist mit 0,35 mm ebenfalls über dem Grenzwert von 0,2 mm. Die Balken der Gesteinskörnung 2 sowie der Gesteinskörnung 3 erreichen mit Maximaldehnungen von 0,5 mm/m nicht den Grenzwert der Alkali-Richtlinie nach 270 Tagen. Die weitere Lagerungsdauer bis 360 Tage zeigt keine Veränderung. Bei diesen Gesteinskörnungen ist die Reaktivität jedoch durch die Rissbreite der Würfel ersichtlich. Der Würfel der Gesteinskörnung 2 weist sehr hohe Rissbreiten von 0,85 mm nach 270 Tagen auf. Und auch die weitere Messung bis 12 Monate zeichnet Rissbreiten von 1,5 mm ab. Somit ist die Gesteinskörnung 2 als deutlich reaktiv einzustufen. Die Gesteinskörnung 3 besteht nach der Alkali-Richtlinie die Prüfung. Durch eine um 90 Tage verlängerte Lagerungsdauer werden Rissbreiten am Würfel von bis zu 0,5 mm gemessen. Die Gesteinskörnung 3 ist somit eine spät reagierende Gesteinskörnung. Beim Beton mit der Gesteinskörnung 4 zeigen sich weder Dehnungen noch Risse. Selbst nach Lagerungszeiten von über einem Jahr können hier keine makroskopischen Schädigungen des Betons infolge AKR festgestellt werden.

Aus den Betonversuchen ergeben sich folgende Charakteristika der Gesteinskörnungen:

- Gesteinskörnung 1: Kies, der sowohl auf Grund der Balkendehnung von  $> 0,6$  mm/m als auch über die Rissbreite am Würfel von  $> 0,2$  mm als alkaliempfindlich zu bewerten ist.
- Gesteinskörnung 2: Grauwacke, welche keine signifikanten Dehnungsauffälligkeiten der Balken zeigt, jedoch Würfelrissbreiten weit über dem Grenzwert aufweist und somit als alkaliempfindlich zu bewerten ist.
- Gesteinskörnung 3: Rhyolith, der bis zum 270. Lagerungstag keine signifikanten Dehnungen oder Risse des Betons aufweist, jedoch danach durch eine erhöhte Rissbildung am Würfel als spät reagierende Gesteinskörnung zu beschreiben ist.
- Gesteinskörnung 4: Kies, welcher nicht reaktiv ist und auch weit über ein Jahr in der 40 °C-Nebelkammer keine Dehnungen oder Risse des Betons infolge AKR zeigt.

Es gilt nun an diesen Gesteinskörnungen Eigenschaften zu finden, welche es erlauben, diese Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit zu unterscheiden, ohne aufwändige und lang andauernde Prüfverfahren anzuwenden. Natürliche Gesteinskörnungen sind Naturprodukte. Ihre Form, Gestalt und Beschaffenheit als auch ihre Zusammensetzung unterliegen Schwankungen, die durch eine gute Aufbereitung reduziert werden können. Die im Labor bestimmten Eigenschaften einer Gesteinskörnung können stets nur Aussagen über die dabei untersuchten Proben liefern. Fortlaufende Untersuchungen der Gesteinskörnungen sind notwendig, um eine gleichmäßig gute Qualität der Gesteinskörnungen zu gewährleisten. Demnach sind die AKR-relevanten Eigenschaften möglichst einfach, jedoch mit reproduzierbaren und verallgemeinerbaren Ergebnissen zu bestimmen, um somit effizient auch hinsichtlich der Dauer und der Kosten zu prüfen.

#### 5.1.2 Schnellprüfverfahren

Die Alkali-Richtlinie [4] bietet mit dem Schnellprüfverfahren eine Möglichkeit, Korngruppen mit Korngrößen  $\geq 2$  mm hinsichtlich ihrer Reaktivität schnell zu beurteilen. Für die Gesteinskörnungen 2 und 3 als Festgesteine gilt die Prüfung der Korngruppe 8/16 mm als ausreichend. Bei den Gesteinskörnungen 1 und 4 handelt es sich um Kiese, welche als Mischung der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm zu prüfen sind. In der Abbildung 11 sind die Dehnungen über die Lagerungsdauer von

13 Tagen abgetragen. Als Grenzwert für die Alkaliempfindlichkeitsklasse EI-S gilt eine Dehnung  $\leq 1,0$  mm/m.

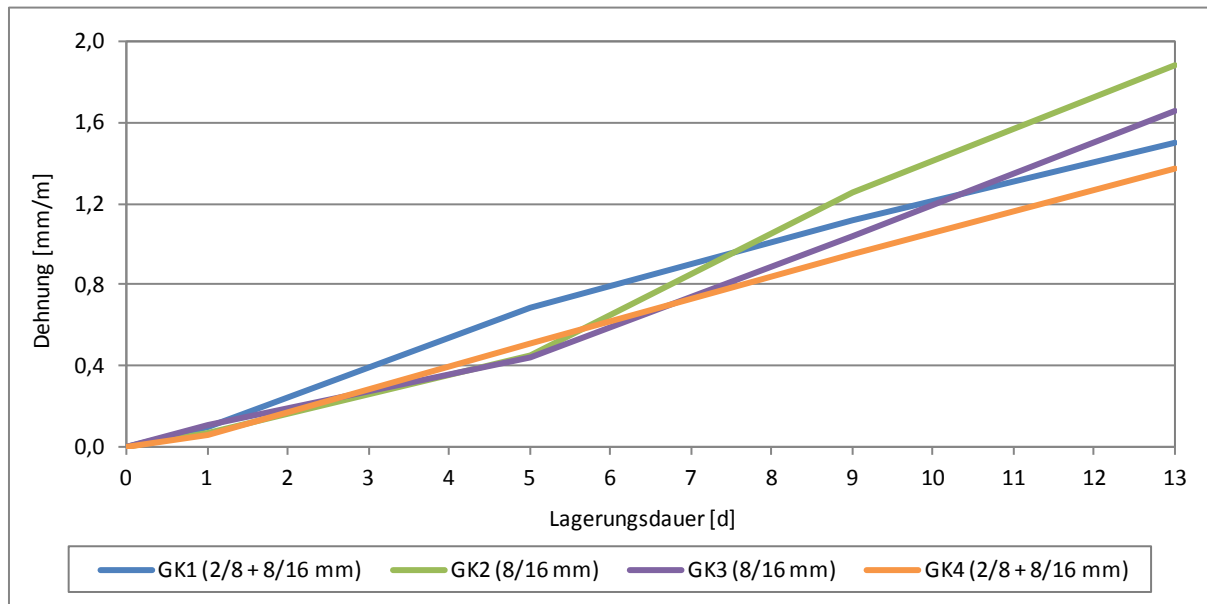


Abbildung 11: Ergebnisse - Schnellprüfverfahren der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Es ist festzustellen, dass am 13. Lagerungstag die Mörtelprismen der vier Gesteinskörnungen Dehnungen zwischen 1,37 mm/m und 1,88 mm/m und somit über dem Grenzwert von 1,0 mm/m aufweisen. Dadurch kann keine Bewertung der Gesteinskörnungen erfolgen. Um dennoch eine Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse vorzunehmen, muss sich für jede der vier Gesteinskörnungen der 40 °C-Betonversuch (siehe Abbildung 10) anschließen. Weiterhin ist abzuleiten, dass eine differenzierte Bewertung der Gesteinskörnungen durch die Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens nicht möglich ist: Unterschiedliche Reaktivitäten der Gesteinskörnungen nach dem 40 °C-Betonversuch sind mit dem Schnellprüfverfahren nicht zu belegen. Eine direkte Korrelation der Dehnungen bzw. der Rissbreiten des 40 °C-Betonversuchs mit den Dehnungen des Schnellprüfverfahrens ist nicht erkennbar. Besonders die geringen Dehnungsunterschiede im Schnellprüfverfahren widersprechen den sehr großen Reaktionsunterschieden im 40 °C-Betonversuch. So verzeichnet beispielsweise der mit der Gesteinskörnung 4 hergestellte Mörtel eine Enddehnung von 1,37 mm/m und somit die geringste Dehnung, jedoch zeigen die Mörtelprismen mit der Gesteinskörnung 1 nur geringfügig höhere Dehnungen von 1,5 mm/m im Schnellprüfverfahren. Die Gesteinskörnung 1 wird nach dem 40 °C-Betonversuch als deutlich reaktiv eingestuft, wogegen die Gesteinskörnung 4 mit EI-S zu bewerten ist. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei den Festgesteinen, den Gesteinskörnungen 2 und 3, zu erkennen. Beide Gesteinskörnungen weisen im 40 °C-Betonversuch eine deutlich differenzierte Rissbildung am Würfel auf, hingegen sind die Enddehnungen der Mörtelprismen des Schnellprüfverfahrens nur minimal abweichend voneinander. Es werden Enddehnungen von 1,88 mm/m für die Mörtelprismen mit der Gesteinskörnung 2 und 1,66 mm/m für die mit der Gesteinskörnung 3 hergestellten Mörtelprismen gemessen. Folglich ist es mit dem Schnellprüfverfahren nicht möglich, eine genaue Beurteilung der untersuchten Gesteinskörnungen entsprechend dem 40 °C-Betonversuch vorzunehmen. Eine Abstufung der Reaktivität der Gesteinskörnungen ist anhand der Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens nicht zu erkennen.

Eine mögliche Ursache für die Unterschiede der beiden Verfahren kann im Brechen der Gesteinskörnungen oder in der externen Alkalizufuhr beim Schnellprüfverfahren gesehen werden. Außerdem lagern die Prismen beim Schnellprüfverfahren bei 80 °C. Diese hohe Temperatur führt zu Veränderungen der Zusammensetzung der Porenlösung des Zementsteins und zur Zersetzung des Ettringits [22, 23, 24, 26]. Die gemessenen Dehnungen können durch mehrere Reaktionen verursacht sein, welche nicht ausschließlich auf den Mechanismen einer AKR beruhen müssen [26]. Das Schnellprüfverfahren ist für eine sichere Unterscheidung der Alkaliempfindlichkeit dieser Gesteinskörnungen ungeeignet.

## 5.2 Petrografische und mineralogische Begutachtung

Nach Teil 1 der Alkali-Richtlinie [4] ist eine Gesteinskörnung als alkaliunempfindlich einzustufen, wenn keine baupraktischen Schäden beim Einsatz der Gesteinskörnung bekannt sind, die Gesteinskörnung nicht bestimmten Gewinnungsgebieten zuzuordnen ist und keine alkaliempfindlichen Bestandteile entsprechend der Alkali-Richtlinie enthält. Die Bestätigung der Einstufung der Alkaliempfindlichkeit erfolgt über eine petrografische Beschreibung.

### 5.2.1 Petrografische Begutachtung

Die petrografische Begutachtung ist für einen Geologen relativ schnell und kostengünstig anzufertigen. Für die Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 und 4 sind die Ergebnisse der Geröllanalysen in der Tabelle 6 (Kapitel 4.1.2.1) zusammengestellt. Zuerst fällt bei der Gesteinskörnung 1, der sehr hohe Quarzanteil von 60 M.-% auf. Dies ist kein Grund mit einer erhöhten Dehnung im 40 °C-Betonversuch zu rechnen. Zwar gelten mikro- oder kryptokristalline Quarze als alkaliempfindlich, entscheidend dabei ist jedoch der Stresszustand der Quarze bzw. deren Kristallinität. Die quantitative Erfassung der gestressten Quarze über die undulöse Auslöschung ist schwierig und nicht jeder undulöse Quarz ist reaktiv [8]. Somit ist diese Untersuchung nicht zielführend und wurde auch nicht vorgenommen. Der Anteil an Rhyolith und anderen Bestandteilen mit 11 M.-% trägt als mögliche Ursache der Dehnungen des Betons bei. Ausgenommen der kristallinen Geröllkomponenten (15 M.-%) sind die anderen Bestandteile wie Feuerstein oder Kieselschiefer mit weniger als 5 M.-% vertreten. Manchmal sind diese geringen Anteile ursächlich für den Hauptteil der Dehnungen [75]. Feuerstein besteht fast vollständig aus krypto- bis mikrokristallinem  $\text{SiO}_2$  und Kieselschiefer ist reaktiv [8]. Jedoch hat der Flint in der Gesteinskörnung 1 eine Rohdichte von  $2,53 \text{ g/cm}^3$ , womit dieser nach Teil 2 der Alkali-Richtlinie [148, 149, 4] als unempfindlich gilt. Es ist festzuhalten, dass die Gesteinskörnung 1 mögliche alkaliempfindliche Geröllkomponenten beinhaltet, somit ist mit einer Schädigung im Beton zu rechnen. Dies korreliert mit dem Ergebnis des 40 °C-Betonversuchs. Eine erhöhte Dehnung der Balken von 1,33 mm/m ist mit der petrografischen Untersuchung nicht abzuschätzen.

Betrachtet man die Geröllkomponenten der Gesteinskörnung 4, fällt auf, dass Quarze und Quarzite mit einem Gesamtanteil von 3 M.-% nur in geringen Mengen vorkommen. Der Großteil der Gesteinskörnung 4 besteht aus paläozoischen Sedimenten (60 M.-%). Zu dieser Gruppe zählen Tonschiefer und phyllitische Schiefer. Der darin enthaltene Glimmer wird als Ursache für aufgetretene Schäden benannt [8]. Als weiteres Indiz für eine mögliche Schädigung ist der hohe Anteil von Kieselschiefer (12 M.-%) zu beachten. Hinzu kommen Grauwacken, Rhyolithe und Andesite mit etwa 17 M.-%. Damit enthält die Gesteinskörnung 4 mengenmäßig beachtliche Gehalte an Bestandteilen, welche als alkaliempfindlich bekannt sind. Die Bewertung der Ergebnisse der Geröllanalyse der Gesteinskörnung

4 korreliert jedoch keineswegs mit dem Ergebnis des 40 °C-Betonversuchs. Die Gesteinskörnung 4 ist im 40 °C-Betonversuch als unempfindlich einzustufen.

Bei den Geröllanalysen zeigt sich, dass beide Gesteinskörnungen Anteile mit einer möglichen Alkaliempfindlichkeit aufweisen. Die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs stellen heraus, dass die Annahmen zur Reaktivität der Geröllkomponenten unbestätigt bleiben. Die alleinige petrografische Analyse eignet sich nicht zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung [75, 76].

### 5.2.2 Mineralogische Begutachtung

Die Mineralogie ermöglicht es, die Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung und der Struktur der Gesteinskörnungen besser zu verstehen und geht damit weit über die petrografische Beschreibung von Gesteinskörnungen hinaus [74]. Ein Vergleich der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteinskörnungen mit den Untersuchungen des 40 °C-Betonversuchs soll zeigen, ob eine Einstufung der Alkaliempfindlichkeit durch die mineralogische Begutachtung möglich ist.

Die mineralogische Zusammensetzung der Gesteinskörnungen 1 bis 4 ist für die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm in der Tabelle 7 (Kapitel 4.1.2.2) aufgeführt. Unterschiedliche Ergebnisse zwischen den Korngruppen einer Gesteinskörnung sind bei der Gesteinskörnung 4 festzustellen.

Bei der Gesteinskörnung 1 fällt, wie schon bei der Petrografie, der hohe Quarzanteil von über 70 M.-% auf. Vergleicht man dazu die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs ist davon auszugehen, dass ein großer Teil des Quarzes alkalireaktiv und ursächlich für die hohe Dehnung sein kann. Entgegen besteht die Gesteinskörnung 4 nur bis zur Hälfte aus Quarz und ist im 40 °C-Betonversuch nicht reaktiv. Auch bei den Gesteinskörnungen 2 und 3 ist die Alkaliempfindlichkeit unterschiedlich. Die Quarzgehalte unterscheiden sich jedoch nicht im gleichen Maße. Wie schon bei der Petrografie ist allein der Quarzgehalt kein Kriterium für die AKR-Empfindlichkeit der Gesteinskörnung.

Anhand von Linienprofilanalysen ist es möglich, Aussagen über den Kristallinitätsgrad des Quarzes zu treffen. In den Gesteinskörnungen 1 und 4 kommt Quarz nicht nur als separates Gesteinskorn vor, sondern ist in fast jeder silikatischen Geröllkomponente vorhanden. Demnach ergäbe sich ein Durchschnittswert für alle quarzhaltigen Bestandteile. Bei den Gesteinskörnungen 2 und 3 ist keine Korrelation zwischen dem Kristallinitätsgrad des Quarzes und der Empfindlichkeit der Festgesteine möglich. Dies weist Hüniger [12] durch seine Untersuchungen an Grauwacken nach. Eine weitere mineralogische Untersuchung ist demnach nicht zielführend.

Ein erhöhter Anteil an Plagioklas ist bei den Gesteinskörnungen 2 bis 4 zu sehen. Auch der Biotitanteil liegt wesentlich höher als bei der Gesteinskörnung 1. Der Einfluss dieser Minerale, als Bestandteil von Gesteinskörnungen, wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Möglicherweise beschleunigen Feldspat und Glimmer die Schädigungsreaktionen durch die Freisetzung von Alkalien [107, 89]. Diese Minerale enthalten jedoch auch  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Die vorhandenen Feldspäte und Glimmer behindern durch die Mengen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  die Auflösung des Quarzes [99, 100]. Betrachtet man die geringe Schädigung des Betons mit der Gesteinskörnung 3 beim 40 °C-Betonversuch in den ersten neun Monaten, ist die Inhibierung des Quarzes (25 M.-%) durch die Mengen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bis zur einsetzenden Rissentwicklung zu vermuten, jedoch anhand der mineralogischen Analyse nicht zu belegen. Neben dem Quarz besteht die Gesteinskörnung 3 aus Feldspat- und Glimmer (Sanidin, Plagioklas, Mikroklin, Biotit). Die Gesteinskörnung 2 weist ähnliche Anteile bei Quarz, Plagioklas und Biotit auf. Der mit der Gesteinskörnung 2 hergestellte Würfel zeigt aber sehr frühe und starke Schäden

beim 40 °C-Betonversuch. Die Unterschiede sind der Chloritgehalt von etwa 15 M.-% und der Kalk mit ca. 5 M.-% in der Gesteinskörnung 2, was typische Minerale einer Grauwacke sind. In der Gesteinskörnung 3 sind diese Minerale nicht zu finden. Hier ist der Feldspat Sanidin (charakteristisch für Rhyolithe) zu 25 M.-% vertreten. Die Gesteinskörnung 4 beinhaltet ebenfalls Chlorit (16 M.-%), was auf die im Kies vorhandene Grauwacke zurückzuführen ist. Der Beton mit der Gesteinskörnung 4 zeigt keine Schädigung beim 40 °C-Betonversuch, somit ist allein der Chloritanteil kein Kriterium für die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung.

Hünger [80] stellte bei seinen Untersuchungen fest, dass sich die Alkaliempfindlichkeit von präkambriischen Grauwacken anhand von mineralogischen Kriterien wie dem Muskovitgehalt sowie der Korngröße und Anordnung der einzelnen Mineralbestandteile zwar unterscheiden lässt, jedoch die Mineralzusammensetzung allein keine Auskunft über die Alkaliempfindlichkeit einer Grauwacke gibt. Auch die mineralogischen Zusammensetzungen der vier untersuchten Gesteinskörnungen lassen keine Kriterien erkennen, welche die Einstufung der Alkaliempfindlichkeit erlaubt.

Die Betrachtung der petrografischen und mineralogischen Ergebnisse zeigt Unterschiede in der Zusammensetzung der Gesteinskörnungen auf. Allgemeingültige Kriterien für eine Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit können jedoch nicht gefunden werden.

### 5.3 Löseversuche

Das AKR-Gefährdungspotential von Gesteinskörnungen kann durch Löseversuche von Gesteinskörnungen im Alkalischen bestimmt werden. Dies wird auf unterschiedlichste Weise praktiziert. Die Alkaliempfindlichkeit von schnell reagierenden Gesteinskörnungen wie Opalsandstein oder Flint kann durch geeignete Verfahren sicher eingestuft werden [4]. Langsamer reagierende Gesteinskörnungen werden über die Menge an gelöstem Silizium in alkalischen Lösungen beurteilt [84, 109]. Ausgehend von diesen Überlegungen werden im Folgenden die Gesteinskörnungen 1 bis 4 durch Löseversuche im Alkalischen charakterisiert, wobei die Konzentrationen der Siliziumionen in der Lösung bestimmt werden. Die Konzentrationen werden in oxidischer Schreibweise in mg/l angegeben.

#### 5.3.1 Löseversuche 40 °C / 1,0 M KOH-Lösung

##### 5.3.1.1 Bestimmung der Konzentration an gelöstem $\text{SiO}_2$

Die Löseversuche werden bei 40 °C und in 1,0 M KOH-Lösung an den einzelnen Korngruppen der Gesteinskörnungen 1 bis 4 durchgeführt. Die Lagerungstemperatur sowie die Konzentration der KOH-Lösung sind in Anlehnung an den 40 °C-Betonversuch gewählt. Die Porenlösung des Zementsteins mit einem w/z-Wert von 0,45, bestimmt durch Auspressversuche, hat eine  $\text{OH}^-$ -Ionenkonzentration nach 90 Tagen von 927 mmol/l (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Zusammensetzung der Porenlösung des Zementsteins nach 90 d in mmol/l

$\text{OH}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$
927	173	827	1	34

Untersuchungen haben gezeigt, dass einzelne Korngruppen gleicher Gesteinskörnungen durchaus unterschiedliche Reaktivitäten aufweisen können [22]. Das gilt ebenso für Lockergesteine wie auch für Festgesteine, was die nachfolgenden Ergebnisse belegen werden. In der Abbildung 12 sind die



$\text{SiO}_2$ -Konzentrationen der Löseversuche der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 über eine Lagerungsdauer von 360 Tagen dargestellt. Die Löseversuche werden an den originalen Lieferkörnungen durchgeführt, so wie diese auch im 40 °C-Betonversuch Verwendung finden. Abweichend davon, werden die Gesteinskörnungen vor dem Versuch gewaschen und anschließend getrocknet. Durch den Einsatz der Originalkorngrößen (Lieferkörnungen) wird ein Brechen für den Laborversuch vermieden, um den teilweise ungeklärten Einfluss durch die Schaffung veränderter Oberflächen auszuschließen.

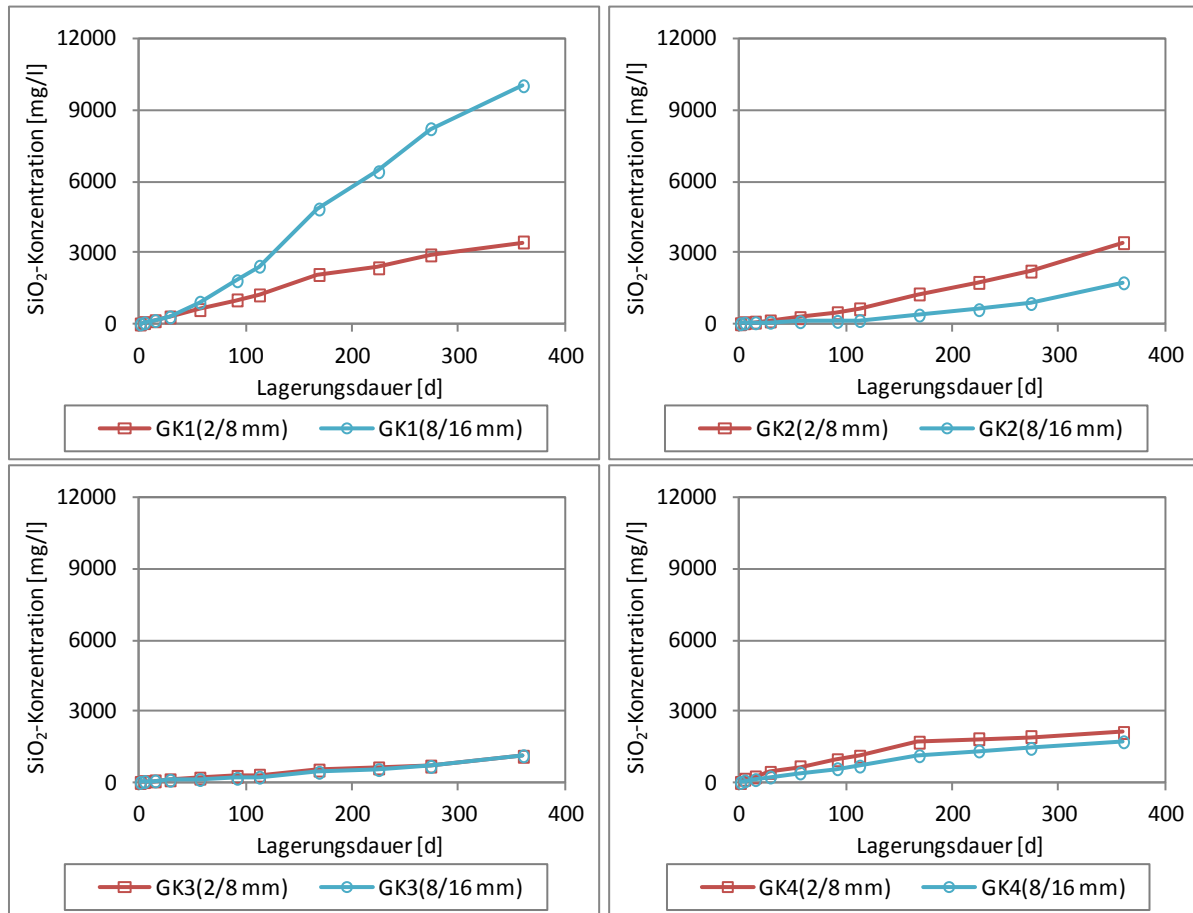


Abbildung 12:  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C

Im linken oberen Diagramm der Abbildung 12 sind die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  für die Gesteinskörnung 1 dargestellt. Zuerst fällt auf, dass die Korngruppe 8/16 mm nach einer Lagerungsdauer von 28 Tagen wesentlich mehr  $\text{SiO}_2$  in Lösung gibt als die Korngruppe 2/8 mm. Weiter ist zu erkennen, dass die Kurven der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen beider Korngruppen der Gesteinskörnung 1 anfangs exponentiell und anschließend nahezu linear ansteigen. Am 360. Lagerungstag erreicht die Korngruppe 2/8 mm eine Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  von 3451 mg/l und die Korngruppe 8/16 mm 10029 mg/l. Somit löst sich bis zum Ende der Lagerungsdauer aus der Korngruppe 8/16 mm ungefähr die dreifache Menge an  $\text{SiO}_2$  im Vergleich zur Korngruppe 2/8 mm. Ein Endwert der Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  ist nicht abzusehen.

Bei den Löseversuchen der Gesteinskörnung 2 (rechts oben in der Abbildung 12) zeigen sich exponentielle Verläufe der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen über die gesamte Lagerungsdauer. Nach 360 Tagen wird für die Korngruppe 2/8 mm eine  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung von 3415 mg/l und für 8/16 mm 1723 mg/l gemessen. Es kann vermutet werden, dass auch bei den Korngruppen der Gesteinskör-

nung 2 die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in den Lösungen noch weiter ansteigen. Auffällig ist, dass nicht wie bei der Gesteinskörnung 1 die Lösung mit der Korngruppe 8/16 mm die höchste  $\text{SiO}_2$ -Konzentration aufweist, sondern in diesem Fall die Korngruppe 2/8 mm mehr  $\text{SiO}_2$  in die alkalische Lösung freisetzt.

Für die Gesteinskörnung 3 sind die Ergebnisse im unteren linken Diagramm der Abbildung 12 dargestellt. Hier steigt die Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  bis zum 270. Lagerungstag nahezu linear an und verzeichnet anschließend einen sprunghaften Anstieg. Beide Korngruppen der Gesteinskörnung 3 geben fast identische Mengen an  $\text{SiO}_2$  in die Lösung. Zwischen dem 28. und dem 270. Lagerungstag unterscheiden sich die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in der Lösung um circa 60 - 100 mg/l. Dabei liegt die Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  bei der Korngruppe 8/16 mm unter der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung mit der Korngruppe 2/8 mm. Zum Lagerungsende finden sich bei der Korngruppe 2/8 mm 1102 mg/l und bei der Korngruppe 8/16 mm 1125 mg/l an  $\text{SiO}_2$  in der Lösung.

Das Diagramm der Gesteinskörnung 4 (rechts unten in der Abbildung 12) zeigt einen zweigeteilten Verlauf der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen. Bis zum 168. Lagerungstag geht das  $\text{SiO}_2$  der Gesteinskörnung 4 schneller in Lösung als nach diesem Lagerungstag. Trotzdem zum Ende der Lagerungsdauer die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung wesentlich langsamer ansteigt, ist die maximale Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  noch nicht erreicht. Nach 360 Tagen sind, wie schon bei den Gesteinskörnungen 1 und 2, auch bei den Löseversuchen der Gesteinskörnung 4 die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  mit 2103 mg/l für die Korngruppe 2/8 mm und 1713 mg/l für die Korngruppe 8/16 mm unterschiedlich.

Die Gegenüberstellungen der einzelnen Korngruppen der Gesteinskörnungen zeigen, dass nicht zwangsläufig die weniger grobe Korngruppe 2/8 mm eine erhöhte Löslichkeit auf Grund einer vermutlich größeren Oberfläche haben muss, sondern auch bei der Korngruppe 8/16 mm die höheren  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen im Löseversuch auftreten können. Es kann aber auch der Fall wie bei der Gesteinskörnung 3 eintreten, dass die alkalischen Lösungen beider Korngruppen fast identische  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen aufweisen. Somit müssen noch andere Faktoren ursächlich für unterschiedliche oder gar gleiche  $\text{SiO}_2$ -Löslichkeiten der Korngruppen sein. Die Vorgehensweise, die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung über die Prüfung von nur einer Korngruppe einzustufen, wie es bei gebrochenen Festgesteinen beim Schnellprüfverfahren möglich ist, ist auf Grund der vorliegenden Ergebnisse äußerst fragwürdig.

Für einen Vergleich der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen der Löseversuche der Gesteinskörnungen mit den Dehnungs- und Rissbreitenentwicklungen des 40 °C-Betonversuchs werden die Ergebnisse der beiden Einzelprüfungen der Korngruppen der Löseversuche dem Volumenverhältnis 57:43 entsprechend des 40 °C-Betonversuchs gewichtet. Dies ist notwendig, weil im 40 °C-Betonversuch die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm gemeinsam geprüft werden. Die Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der gewichteten Löseversuche.

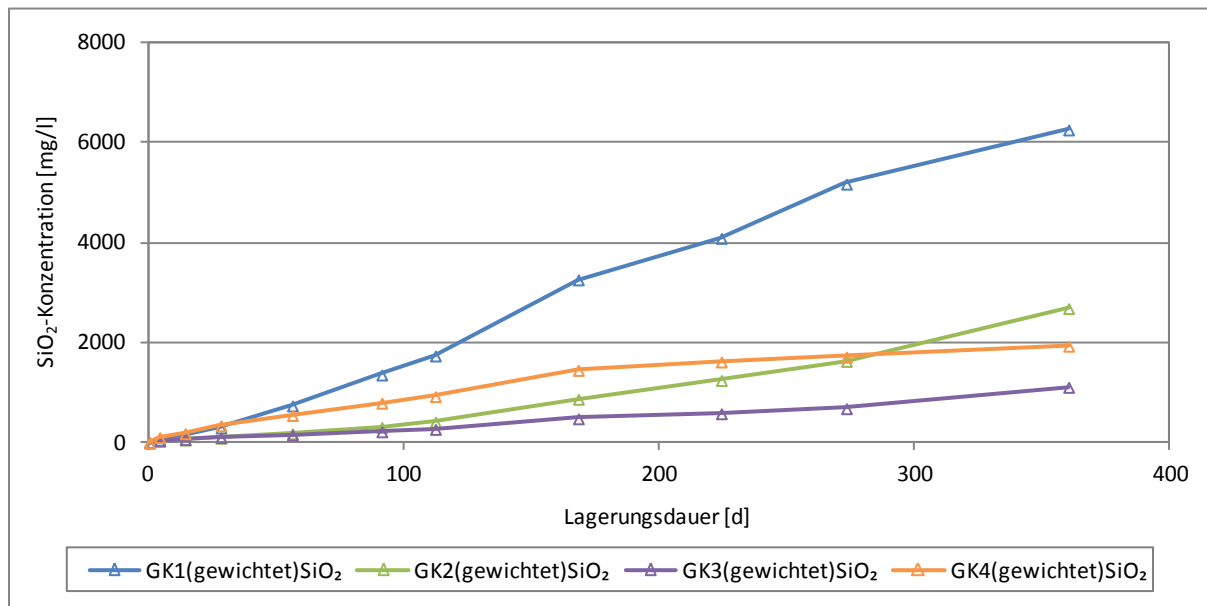


Abbildung 13: Gewichtete SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C

Die Gesteinskörnung 1 ist auf Grund der Dehnungs- wie auch der Rissbreitenentwicklung der daraus hergestellten Probekörper im 40 °C-Betonversuch als sehr reaktiv einzustufen. Insbesondere der relativ hohe Dehnungsendwert der Balken von 1,33 mm/m, der schon nach 140 Lagerungstagen erreicht ist, setzt eine hohe Konzentration an gelöstem SiO<sub>2</sub> voraus. Die gewichtete Konzentration an gelöstem SiO<sub>2</sub> der Gesteinskörnung 1 steigt nahezu linear an und erreicht am Ende der Lagerungsdauer eine mehr als doppelt so hohe SiO<sub>2</sub>-Konzentration im Vergleich zu den Lösungen der anderen Gesteinskörnungen. Die gewichtete SiO<sub>2</sub>-Konzentration der Lösung der Gesteinskörnung 2 hat über die gesamte Lagerungsdauer einen exponentiell ansteigenden Verlauf. Das SiO<sub>2</sub> wird hier deutlich langsamer und weniger als bei Gesteinskörnung 1 gelöst. Die deutlich erhöhte Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung 2, welche sich durch die starke Rissbildung am Würfel (0,85 mm nach 270 Tagen) zeigt, ist mit der Gesteinskörnung 1 vergleichbar. Die signifikant geringeren Konzentrationen an gelöstem SiO<sub>2</sub> weisen jedoch auf ein deutlich geringeres Reaktionspotential der Gesteinskörnung 2 hin.

Vergleicht man die Löseversuche der Gesteinskörnungen 2 und 3 miteinander, sind sowohl die Absolutwerte als auch der Kurvenanstieg der Konzentration an gelöstem SiO<sub>2</sub> bei der Gesteinskörnung 2 höher als bei der Gesteinskörnung 3. Die makroskopischen Effekte der Probekörper im 40 °C-Betonversuch unterscheiden sich ebenfalls stark voneinander. Die Rissbreite am Würfel mit der Gesteinskörnung 2 ist schon während der ersten Monate messbar und mit 1,5 mm am 360. Lagerungstag um ein Vielfaches höher als beim Würfel mit der Gesteinskörnung 3, bei welchem anfängliche Risse erst nach neun Monaten auftreten und die Rissbreite nach 360 Lagerungstagen bei 0,5 mm liegt. Diese Unterschiede sind aus dem zeitlichen Verlauf der SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Löseversuche erklärbar: Die Gesteinskörnung 2 gibt über die gesamte Lagerungsdauer zunehmende Mengen an SiO<sub>2</sub> in Lösung, wogegen bei der Gesteinskörnung 3 die in Lösung gehende Menge an SiO<sub>2</sub> fast stagniert, bis nach dem 270. Lagerungstag die SiO<sub>2</sub>-Konzentration deutlich ansteigt. Genau zu diesem Zeitpunkt treten auch erste Risse am Betonwürfel auf. Darüber hinaus erreicht zum Ende der Lagerungsdauer der Würfel mit der Gesteinskörnung 2 nicht nur die dreifache Rissbreite sondern die SiO<sub>2</sub>-Konzentration in der Lösung mit der Gesteinskörnung 2 ist auch dreifach höher als beim Einsatz der Gesteinskörnung 3.

Bei der Verwendung der Gesteinskörnung 4 im Beton treten hingegen weder signifikante Dehnungen noch Risse im 40 °C-Betonversuch auf, obwohl eine vergleichbare  $\text{SiO}_2$ -Konzentration wie bei der Gesteinskörnung 2 in der Lösung nachzuweisen ist. Besonders anzumerken ist, dass in der Lösung mit der Gesteinskörnung 4 im Vergleich zur Lösung mit der Gesteinskörnung 2 die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration schon deutlich früher erhöht ist. Am 56. Lagerungstag ist beim Löseversuch mit der Gesteinskörnung 4 eine  $\text{SiO}_2$ -Konzentration von 547 mg/l nachzuweisen. Auch mit der Gesteinskörnung 1, bei der die Balken im 40 °C-Betonversuch zu diesem Messtermin schon eine Erhöhung der Dehnungen zeigen, hat die Lösung eine  $\text{SiO}_2$ -Konzentration von 738 mg/l nach 56 Tagen. Die verschiedenen  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen belegen keinesfalls die unterschiedlichen Dehnungen des 40 °C-Betonversuchs zu diesem Zeitpunkt.

Es ist festzuhalten, dass alle vier Gesteinskörnungen im Untersuchungszeitraum von 360 Tagen deutlich unterscheidbare Ergebnisse im Löseversuch aufweisen. So sind unterschiedliche  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in der Lösung nachweisbar. Dies betrifft zum einen die absolut gemessenen  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen als auch den zeitlichen Verlauf der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in den alkalischen Lösungen mit den darin enthaltenen Gesteinskörnungen. Dennoch lassen sich die Dehnungs- und Rissbreitenentwicklungen der Probekörper beim 40 °C-Betonversuch nicht für alle untersuchten Gesteinskörnungen durch die aus den Löseversuchen ermittelten  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen erklären.

#### 5.3.1.2 Bestimmung der Konzentration an gelöstem $\text{Al}_2\text{O}_3$

Bei vielen Gesteinskörnungen ist die alleinige Betrachtung der Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  nicht für die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit geeignet [75, 92]. Ein Grund dafür ist, dass in der alkalischen Porenlösung des Betons neben dem  $\text{SiO}_2$  noch gelöstes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  den Ablauf einer AKR beeinflussen kann. Durch den Einsatz von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen im Beton kann eine AKR im Beton inhibiert werden [104, 67, 63]. Untersuchungen zeigen auch das Herauslösen von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus Gesteinskörnungen [89], wodurch aluminosilikatische Komplexbildungen zur  $\text{SiO}_2$ -Bindung bzw. Blockierungseffekte der Oberflächen von  $\text{SiO}_2$  liefernden Bestandteilen nachzuweisen sind [98, 101, 12]. Ausgehend davon werden im Folgenden die bei den Löseversuchen gemessenen Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  betrachtet. In der Abbildung 14 sind die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der alkalischen Lösungen mit den darin enthaltenen Gesteinskörnungen über die Lagerungsdauer von 360 Tagen abgetragen.

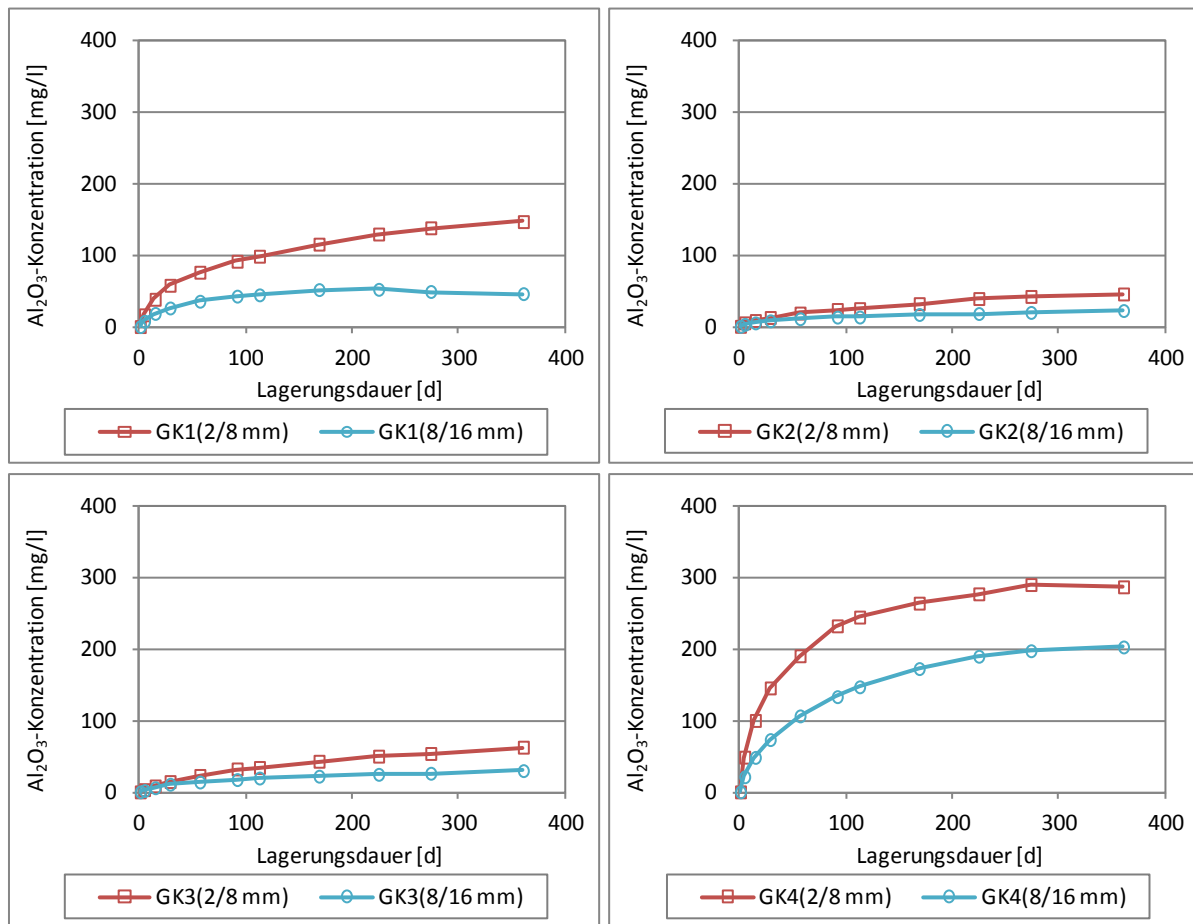


Abbildung 14:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C

Bei der Abbildung 14 fällt zuerst auf, dass die Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  für die Gesteinskörnungen untereinander als auch für die jeweiligen Korngruppen sehr unterschiedlich sind, jedoch die Kurvenverläufe der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen gleichermaßen mit logarithmischen Funktionen zu beschreiben sind. Besonders starke Differenzen zwischen den  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen treten bei den Korngruppen der Gesteinskörnung 1 auf. Abweichend von den  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen ist es hier die Korngruppe 2/8 mm, welche eine größere Menge an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in Lösung gibt. Bei der Korngruppe 8/16 mm nimmt die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung nach dem Erreichen eines Maximums von 52 mg/l leicht ab, während dessen bei der Korngruppe 2/8 mm die Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit 147 mg/l noch keinen Endwert am Ende der Lagerungsdauer erreicht hat.

Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in den Lösungen mit der Gesteinskörnung 2, dargestellt im rechten oberen Diagramm der Abbildung 14, stellen ebenfalls Unterschiede der beiden Korngruppen heraus. Nach 360 Tagen weist die Lösung mit der Korngruppe 2/8 mm (45 mg/l) die doppelte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration wie die Lösung mit der Korngruppe 8/16 mm (22 mg/l) auf. In beiden Löseversuchen wird kein Endwert erreicht.

Ein ähnliches Bild tritt bei den Löseversuchen der Gesteinskörnung 3 auf. Am Ende der Lagerungsdauer ist die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung mit der Korngruppe 2/8 mm (63 mg/l) doppelt so hoch wie in der Lösung mit der Korngruppe 8/16 mm (30 mg/l). Ein Endwert der Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kann auch hier nicht festgestellt werden.

Bei den Löseversuchen der Korngruppen der Gesteinskörnung 4 sind von den untersuchten Gesteinskörnungen die höchsten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in der Lösung zu messen. Weiter handelt es sich bei den  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen von 287 mg/l bei der Korngruppe 2/8 mm und 203 mg/l bei der Korngruppe 8/16 mm um Maximalwerte. Bei Verwendung der Gesteinskörnung 4 im Beton treten keine Schäden im 40 °C-Betonversuch auf.

Ausgehend davon, dass das gelöste Aluminium zur Vermeidung einer AKR beiträgt, sollte die Gesteinskörnung mit der höchsten Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  die geringste Alkaliempfindlichkeit aufweisen. Dies kann durch den 40 °C-Betonversuch belegt werden, bei welchem mit der Gesteinskörnung 4 keine Schädigungen im Beton festzustellen sind. Die anderen drei Gesteinskörnungen, die beim 40 °C-Betonversuch zu Dehnungen oder Rissbildungen der Probekörper führen, haben deutlich geringere  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in der Lösung. Jedoch offenbart sich keine Abstufung hinsichtlich der unterschiedlichen Reaktivität der Gesteinskörnungen. Die Gesteinskörnungen 2 und 3 verursachen beim 40 °C-Betonversuch signifikant abweichende Rissbreitenentwicklungen der Würfel, zeigen im Löseversuch jedoch nahezu identische  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen über die Lagerungsdauer. Die Gesteinskörnung 1, welche als deutlich reaktiv durch die erhöhten Dehnungen der Balken beim 40 °C-Betonversuch zu bewerten ist, weist im Vergleich zur Gesteinskörnung 3 ein Vielfaches der Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  auf. Demnach macht die Gegenüberstellung der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der Lösungen der vier Gesteinskörnungen in der Abbildung 14 deutlich, dass allein über die Interpretation der Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ebenfalls keine Aussage über die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen getroffen werden kann.

Die Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 zeigen deutlich, dass es signifikante Unterschiede in den Löslichkeiten der Gesteinskörnungen gibt. Dies betrifft nicht nur die Absolutwerte am Ende der Lagerungszeit sondern insbesondere auch die zeitabhängige Freisetzung der Mengen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Hüniger [12] beschreibt bei seinen Untersuchungen an den präkambri-schen Grauwacken die steuernde Funktion des Aluminiums auf die  $\text{SiO}_2$ -Freisetzung im alkalischen Milieu. Dabei sind alumosilikatische Strukturen in der Lösungsphase nachzuweisen, welche sich teilweise auf der Quarzoberfläche bilden [79]. In der Abbildung 15 werden deshalb die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  der Gesteinskörnungen in einem Diagramm dargestellt. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der Löseversuche der einzelnen Korngruppen werden auf der zweiten y-Achse abgetragen und wie die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen gewichtet.

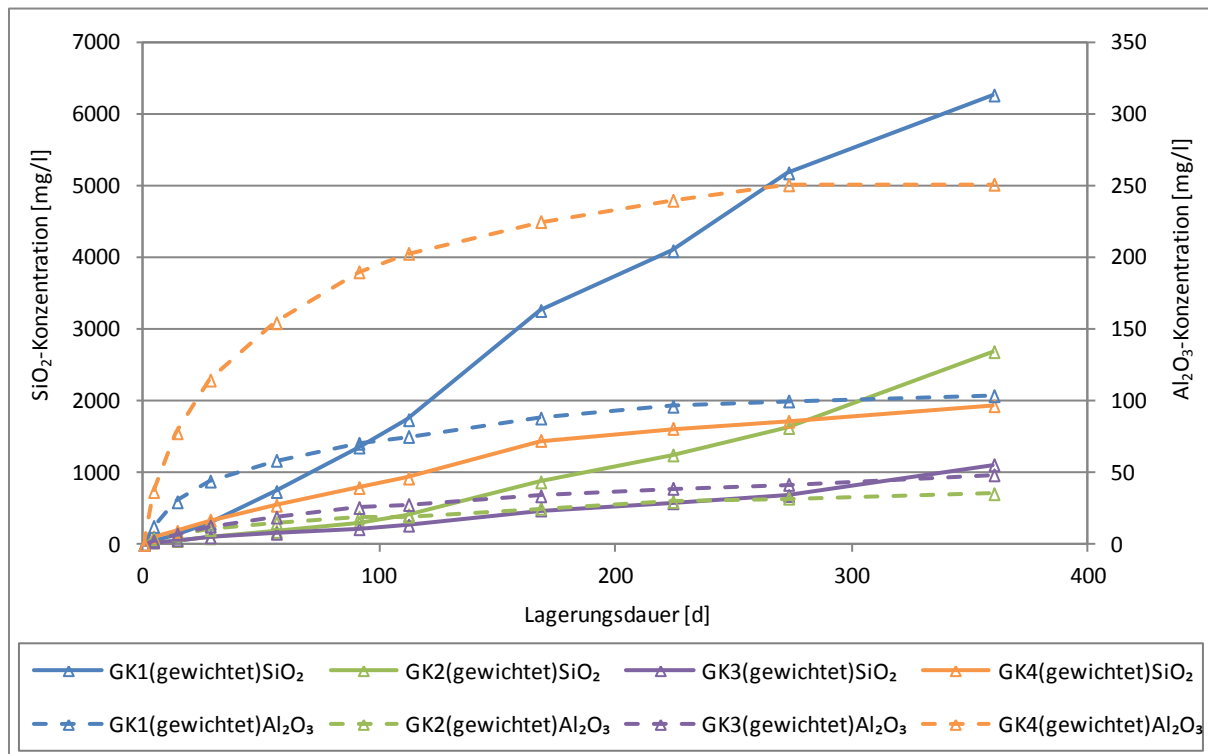


Abbildung 15: Gewichtete  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C

Vergleicht man nun die Lösekurven der Gesteinskörnungen mit den dazugehörigen Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs, lassen sich die Dehnungs- und Rissbreitenentwicklungen durchaus anhand der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationsverläufe erklären. Hierbei handelt es sich um eine Abschätzung, da die gegenseitige Beeinflussung von gelösten  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  unter den Lagerungsbedingungen von 40 °C und 1,0 M KOH-Lösung nicht bekannt sind. Die Gesteinskörnungen 1 und 2 sind als sehr reaktiv einzustufen. Dies belegen die erhöhten Balkendehnungen bzw. Würfelrissbreiten beim 40 °C-Betonversuch. Dementsprechend hoch muss die Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  sein. Die Gesteinskörnung 1 weist eine vielfach höhere  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung als die Gesteinskörnung 2 auf. Ausgehend von einer anteilig gebundenen Menge des Siliziums durch das Aluminium ist bei der Gesteinskörnung 1 von einer ausgeprägten Einbindung des gelösten  $\text{SiO}_2$  in aluminosilikatische Strukturen auszugehen, wodurch sich die hohe  $\text{SiO}_2$ -Konzentration reduziert. Bei den Gesteinskörnungen 2 und 3 sind deutlich geringere  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in Lösung. Eine Verringerung der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen ist demnach zu vernachlässigen und die Mengen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  sind nahezu vollständig betonschädigend anzurechnen. Ausgehend von einer reduzierten Konzentration des gelösten  $\text{SiO}_2$  der Gesteinskörnung 1 stellt sich in der Abbildung 15 für die Gesteinskörnungen 1 bis 3 die gleiche Reihenfolge wie im 40 °C-Betonversuch heraus. Die Gesteinskörnungen 1 und 2 sind deutlich reaktiv und bei der Gesteinskörnung 3 treten erste Risse am Würfel erst nach 270 Tagen auf, wo dann auch die Kurve der Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  ansteigt. Bei der Gesteinskörnung 4 ist die höchste  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung zu bestimmen. Diese ist mehr als doppelt so hoch wie bei der Lösung mit der Gesteinskörnung 1. Bei der Gesteinskörnung 4 ist von einer noch stärkeren Einbindung des gelösten  $\text{SiO}_2$  durch die Bildung von aluminosilikatischen Strukturen auszugehen. Nur durch die unschädliche Bindung von bestimmten Mengen des Siliziums ist es erklärbar, dass keine Schäden bei der Verwendung der Gesteinskörnung 4 im 40 °C-Betonversuch feststellbar sind. Weiter zeigt sich ab dem 168. Lagerungstag, dass die erhöhte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung einen weiteren Anstieg der Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  mindert. Hier liegt die Vermutung nahe, dass eine

bestimmte Konzentration an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in der Lösung erst erreicht werden muss, um die Menge an frei werdendem Silizium zu binden oder die Freisetzung zu verhindern. Die Rolle des Aluminiums bei der Inhibierung einer schädigenden AKR wird in der internationalen Literatur beispielsweise von Chappex und Scrivener [68] diskutiert, die genaue Funktionsweise des Aluminiums ist jedoch bis heute nicht geklärt.

Die genannten Zusammenhänge machen es nun möglich, die makroskopischen Beobachtungen am Beton mit chemischen Kennwerten eindeutig zu belegen. Anhand der ermittelten  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in den jeweiligen Lösungen der vier sehr unterschiedlichen Gesteinskörnungen konnten die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs nachgestellt werden. Ziel war es jedoch nicht, den lang andauernden Betonversuch durch einen neuen chemischen Test zu ersetzen, welcher genauso viel Zeit beansprucht. Dennoch ist festzuhalten, dass die Löseversuche unter den Bedingungen 40 °C und 1,0 M KOH-Lösung eine andere Möglichkeit bieten, Gesteinskörnungen hinsichtlich Ihrer Reaktivität im Alkalischen zu beschreiben. Im Folgenden wird nach Möglichkeiten der Beschleunigung des Verfahrens gesucht, ohne wesentlich die Aussage der Untersuchungsergebnisse hinsichtlich einer Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung zu verändern.

### 5.3.2 Parameter zur Beschleunigung des Löseversuchs

Veränderbare Parameter des Systems zur Beschleunigung der Löseversuche sind:

- Durchmischung der alkalischen Lösung
- Feststoff-Laugen-Verhältnis
- Oberfläche der Gesteinskörnung
- Lagerungstemperatur
- Konzentration der alkalischen Lösung

#### 5.3.2.1 Durchmischung der alkalischen Lösung

Das Rühren bzw. Schütteln der alkalischen Lösung führt zur Erhöhung der Löslichkeit der Gesteinskörnungen aber auch zur Entfernung vom realen Betonsystem, wo eine ständige Durchmischung der Gesteinskörnung mit der alkalischen Porenlösung nicht stattfindet. Die Schwierigkeit bei Rührprozessen liegt in der Vergleichbarkeit der Rührgeschwindigkeiten. Zudem könnten durch das andauernde Durchmischen die Gesteinskörnungen vermehrt aneinander prallen und so neue Oberflächen geschaffen werden, welche im Beton nicht vorhanden wären. Die Durchmischung der alkalischen Lösung wird als Möglichkeit, die Lösegeschwindigkeit zu erhöhen, ausgeschlossen.

#### 5.3.2.2 Feststoff-Laugen-Verhältnis

Das gewählte Feststoff-Laugen-Verhältnis beträgt 1:10. Auflösungsprozesse von Feststoffen sind wesentlich vom Verhältnis fester zu flüssiger Phase abhängig. Eine Änderung des Feststoff-Laugen-Verhältnisses führt somit zu vollständig anderen Bedingungen, wodurch Vergleiche zu vorherigen Untersuchungen von Bachmann und anderen [135] schwer möglich sind. Weiter steht durch den zehnfach höheren Laugenanteil bezogen auf die Gesteinskörnung stets genügend Lösungsmittel zur Verfügung, wodurch eine Ausfällung von Reaktionsprodukten in der alkalischen Lösung verhindert werden soll.

Der Einfluss eines veränderten Feststoff-Laugen-Verhältnisses soll anhand der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in den Lösungen mit der Gesteinskörnung 1 gezeigt werden. Der Kies weist deutliche Unterschiede in der Auflösung der beiden Korngruppen und somit in den Konzentrationen an gelös-



tem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  auf. Das linke Diagramm in der Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse eines Feststoff-Laugen-Verhältnisses von 1:10. Im rechten Diagramm beträgt das Feststoff-Laugen-Verhältnis 1:2. Die Einwaage der Gesteinskörnung ist von 90 g auf 450 g bei gleichbleibender Menge der KOH-Lösung erhöht. Andere Versuchsbedingungen (1,0 M KOH-Lösung, 40 °C) bleiben unverändert.

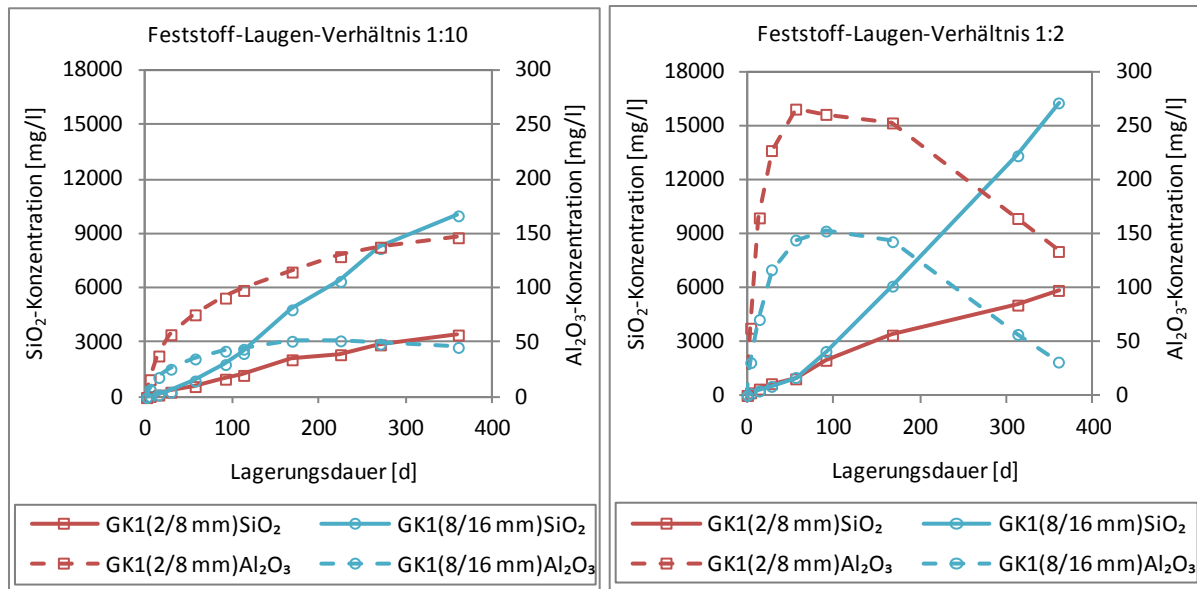


Abbildung 16:  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnung 1 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C mit Feststoff-Laugen-Verhältnis 1:10 und 1:2

Die Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnung 1 zeigen bei dem Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:2, dass die Graphen der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen bis zum 56. Lagerungstag nahezu linear und fast identisch sind. Danach steigt die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung mit der Korngruppe 8/16 mm stärker an als in der Lösung mit der Korngruppe 2/8 mm. Am 360. Lagerungstag beträgt die Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  bei der Korngruppe 2/8 mm 5854 mg/l. Bei Verwendung der Korngruppe 8/16 mm ist die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung mit 16307 mg/l mehr als doppelt so groß. Der Verlauf der Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist anfangs ansteigend und nimmt nach dem Erreichen des Maximums ab. Nach 56 Tagen ist fast die gesamte Menge an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gelöst. Die Maximalwerte in den Lösungen liegen bei 266 mg/l für die Korngruppe 2/8 mm und 153 mg/l für die Korngruppe 8/16 mm.

Am 360. Lagerungstag sind beim Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:2 die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in den Lösungen für beide Korngruppen jeweils um 60 % höher als beim Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:10. Auch die Maxima der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen sind deutlich erhöht. Ausgehend von den höheren Konzentrationen, kann eine Beschleunigung vermutet werden. Beim Vergleich der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen fällt auf, dass bei beiden Feststoff-Laugen-Verhältnissen erst ab dem 90. Lagerungstag verschiedene Löslichkeiten feststellbar sind und somit zu keinem früheren Zeitpunkt eine Differenzierung der Korngruppen auf Grund ihrer  $\text{SiO}_2$ -Löslichkeit erfolgen kann. Die Löslichkeit sollte aber ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal bei der Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit sein. Weiter sind die Maximalwerte der Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  innerhalb der Lagerungszeit verschieden stark erhöht. Am 360. Lagerungstag sind durch eine Verfünffachung des Feststoffanteils die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen bei beiden Lösungen der Korngruppen um 60 % erhöht. Die maximalen Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sind bei der Korngruppe 2/8 mm um 80 % und bei der Korngruppe 8/16 mm um 200 % gesteigert. Auf Grund eines veränderten Feststoff-Laugen-

Verhältnisses von 1:10 auf 1:2 nimmt die Löslichkeit von Aluminium stärker zu als die von Silizium. Zudem ist der Einfluss auf die Aluminiumlöslichkeit bei der Korngruppe 8/16 mm stärker ausgeprägt als bei der Korngruppe 2/8 mm. Nach dem 168. Lagerungstag nimmt die Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  beim Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:2 signifikant ab, was darauf hinweist, dass sich schwer lösliche Reaktionsprodukte bilden. Dies wird durch das höhere Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:10 verhindert. Die abweichenden Reaktionsbedingungen beim Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:2 im Vergleich zu 1:10 führen nicht nur zu erhöhten Konzentrationen in der Lösung sondern auch zu anderen Reaktionsprodukten. Eine schnellere Einstufung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen ist durch die Veränderung des Feststoff-Laugen-Verhältnisses nicht gegeben.

#### 5.3.2.3 Oberfläche der Gesteinskörnung

Das Betongefüge hängt vielfältig von der Oberfläche der eingesetzten Gesteinskörnung ab. So führt beispielsweise eine erhöhte Wasseraufnahme der Gesteinskörnung in Folge einer erhöhten inneren Oberfläche zu einem niedrigeren wirksamen w/z-Wert. Dadurch werden die Zementsteineigenschaften im Kontaktbereich zu der Gesteinskörnung verändert, was Auswirkung auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften wie die Festigkeit und die Dichtigkeit des Betons, sowie die Hydroxidionenkonzentration der Porenlösung des Zementsteins hat.

Die Oberfläche beeinflusst die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen. In Folge einer zunehmenden Mahlfineinheit von Stoffen erhöht sich die Reaktionsgeschwindigkeit mit größer werdender Oberfläche [113]. Zur Verkürzung der Prüfdauer von Gesteinskörnungen werden diese oft gebrochen, um die Reaktionsfähigkeit mit dem umgebenden Medium zu vergrößern. Dies verändert jedoch die ursprünglichen Gesteinskörnungseigenschaften durch die Schaffung neuer Oberflächen, welche so im Beton nicht vorhanden wären. Verschiedenen Veröffentlichungen ist daher die Forderung zu entnehmen, die Prüfung an der originalen Lieferkörnung durchzuführen [7, 28, 21]. Das Brechen der Gesteinskörnungen für den Laborversuch wird als Variante ausgeschlossen, um eine Entfernung vom realen Betonsystem zu vermeiden.

#### 5.3.2.4 Lagerungstemperatur

Für die Beeinflussung der Reaktionsgeschwindigkeit wird oftmals die Temperatur verändert. Die Erhöhung der Temperatur führt zur einer ansteigenden Reaktionsgeschwindigkeit [113, 112]. Die Zerlegung des Betonsystems in die Prüfung des Zementsteins (Auspressversuch) und die Prüfung der Gesteinskörnung (Löseversuch) ermöglicht es, die Temperatur beim Löseversuch zu erhöhen, ohne berücksichtigen zu müssen, dass sich dadurch in einem Betonsystem auch die Zusammensetzung der Porenlösung verändert. Probleme anderer Prüfverfahren, wie Auslaugung und Ettringitzersetzung, auf Grund der Temperaturerhöhung [22, 23, 24, 26] werden ausgeschlossen.

Als Ausgangspunkt für die weitere Betrachtung sind die Ergebnisse der Löseversuche mit 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C in der Abbildung 17 für die Gesteinskörnungen 1 bis 4 in der Korngruppe 2/8 mm nochmals zusammengestellt und werden kurz beschrieben. In dem Diagramm sind die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  über die Lagerungszeit abgetragen.

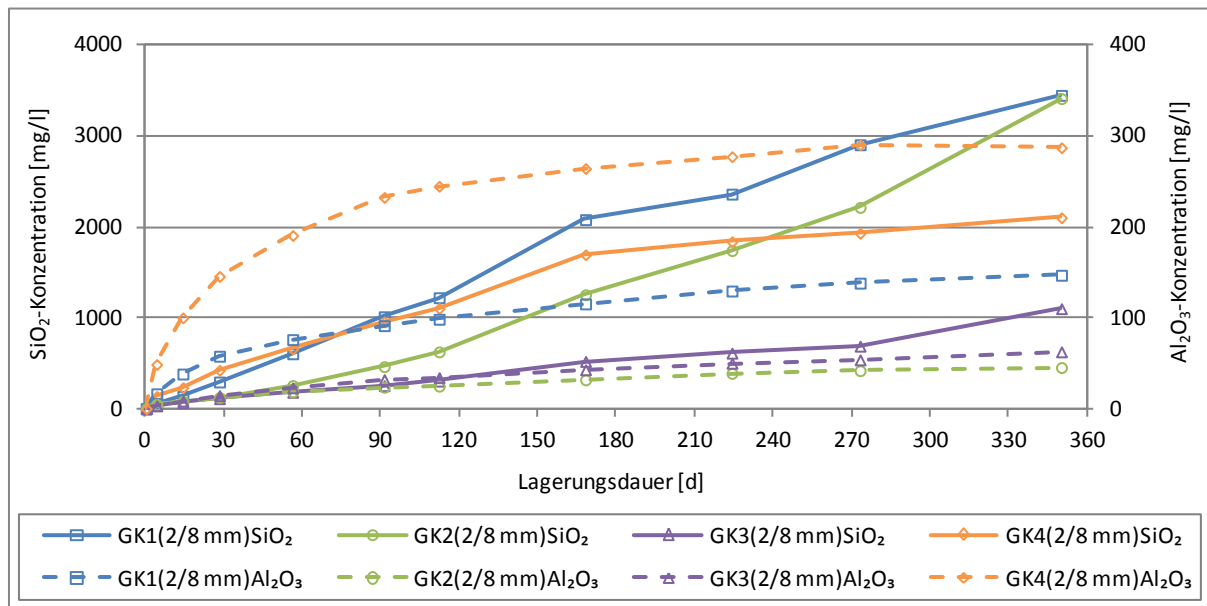


Abbildung 17:  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C

In der Abbildung 17 fällt auf, dass jede der vier Gesteinskörnungen unterschiedliche Verläufe der Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  liefern. Die beiden als reaktiv im 40 °C-Betonversuch eingestuften Gesteinskörnungen 1 und 2 verursachen einen stetigen Anstieg der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in den Lösungen, wobei bei der Gesteinskörnung 1 die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration nahezu linear verläuft und bei der Gesteinskörnung 2 ein exponentieller Verlauf festzustellen ist. Nach 350 Tagen sind die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  mit 3451 mg/l bei der Gesteinskörnung 1 und 3415 mg/l bei der Gesteinskörnung 2 fast gleich. Hingegen ist die Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei der Gesteinskörnung 1 mit 147 mg/l um mehr als das Dreifache höher als bei der Gesteinskörnung 2 mit 45 mg/l. Dass die Gesteinskörnung 3 zu den spät reagierenden zählt, ist im Vergleich zu den Konzentrationsverläufen der Lösungen mit den anderen Gesteinskörnungen gut zu erkennen. Nach dem 270. Lagerungstag ist ein sprunghafter Anstieg der Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  von 689 mg/l auf 1102 mg/l zu sehen. Dieser Zuwachs erklärt auch die plötzlich auftretenden Risse am Würfel im 40 °C-Betonversuch. Die Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  von 63 mg/l am letzten Lagerungstag ist wie auch bei Lösung mit der Gesteinskörnung 2 sehr gering. Die alleinige Betrachtung der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung mit der Gesteinskörnung 4 von 2103 mg/l am 350. Lagerungstag würde die Bewertung der Gesteinskörnung als deutlich reaktiv zulassen. Jedoch zeigt diese Gesteinskörnung weder Risse noch Dehnungen der Probekörper im 40 °C-Betonversuch. Besonderes Augenmerk bei der Gesteinskörnung 4 ist auf den Graph der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration zu legen. Dieser steigt bis zum 168. Lagerungstag relativ stetig an und verläuft dann nahezu parallel zur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration. Mit 287 mg/l nach 350 Tagen ist die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung hier entscheidend höher als bei den Lösungen der anderen drei Gesteinskörnungen. Wie schon bei den gewichteten Konzentrationen in der Abbildung 15 festgestellt, muss auch bei der einzelnen Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 4 das relativ viel gelöste Aluminium bestimmte Mengen des Siliziums unschädlich binden, so dass keine Dehnungen oder Risse am Beton entstehen können. Es kann gezeigt werden, dass die Diskussion der Ergebnisse der Korngruppe 2/8 mm ähnliche Aussagen über die Reaktivität der Gesteinskörnungen 1 bis 4 zulässt wie die Betrachtung der gewichteten Ergebnisse unter Einbeziehung der Korngruppe 8/16 mm. Dadurch ist es möglich die Temperaturerhöhung ausschließlich bei den Löseversuchen mit der Korngruppe 2/8 mm zu untersuchen.

Die wesentlichen Aussagen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Einstufung der Alkalireaktivität zeigen differenzierte  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen im Löseversuch in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C.
2. Die  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in den Lösungen nehmen über die Lagerungszeit zu.
3. Der Verlauf der Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  spiegelt die Alkalireaktivität der Gesteinskörnungen wider.
  - a. reaktiv: Die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration steigt über die gesamte Lagerungszeit linear bzw. exponentiell an. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration ist nicht ausreichend, um die gesamte Menge an gelösten  $\text{SiO}_2$  zu binden.
  - b. spät reaktiv: Der Anstieg der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration ist am Beginn der Lagerungszeit zu gering für eine schädigende AKR. Zu einem späteren Zeitpunkt der Lagerung steigt die Löslichkeit von  $\text{SiO}_2$  signifikant an. Die dann vorhandene  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration reicht nicht aus, um die gesamte Menge an gelöstem  $\text{SiO}_2$  zu binden.
  - c. nicht reaktiv: Die über die Lagerungszeit gelöste Menge an  $\text{SiO}_2$  ist zu gering für eine schädigende AKR bzw. wird ausreichend durch das genügend gelöste  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gebunden. Der Anstieg der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration wird mit zunehmender Lagerungszeit geringer.

Für die Klärung der Frage, ob eine Temperaturerhöhung zu einer Beschleunigung der Löseversuche führt, ohne die Aussagen 1 bis 3 wesentlich zu verändern, wird bei den nachstehenden Untersuchungen die Lagerungstemperatur schrittweise um 20 K erhöht. Die anderen Versuchsbedingungen werden nicht verändert. Dementsprechend wird die Korngruppe 2/8 mm der vier Gesteinskörnungen jeweils in 1,0 M KOH-Lösung bei 60 °C und 80 °C gelagert. Diese Temperaturen finden Anwendung bei den in der Alkali-Richtlinie aufgeführten Prüfverfahren: 60 °C-Betonversuch und Schnellprüfverfahren [4], wobei unter diesen Lagerungsbedingungen die Porenlösung des Zementsteins eine andere Zusammensetzung aufweisen wird. Bei diesen erhöhten Temperaturen ist eine Beschleunigung der Löseprozesse anzunehmen. Deshalb wird die Lagerungsdauer bei den Versuchen gekürzt. Die Versuche bei 60 °C werden bis zu einer Lagerungszeit von 224 Tagen und bei 80 °C bis zu einer Lagerungsdauer von 56 Tagen durchgeführt. Mit diesen Zeiträumen ist die Dauer der jeweiligen Prüfverfahren abgedeckt bzw. darüber hinausgehend verlängert, um wie bei der 40 °C-Lagerung spät reagierende Gesteinskörnungen wie die Gesteinskörnung 3 zu erfassen. In der Abbildung 18 und der Abbildung 19 sind die Ergebnisse der Untersuchungen bei 60 °C und 80 °C dargestellt.

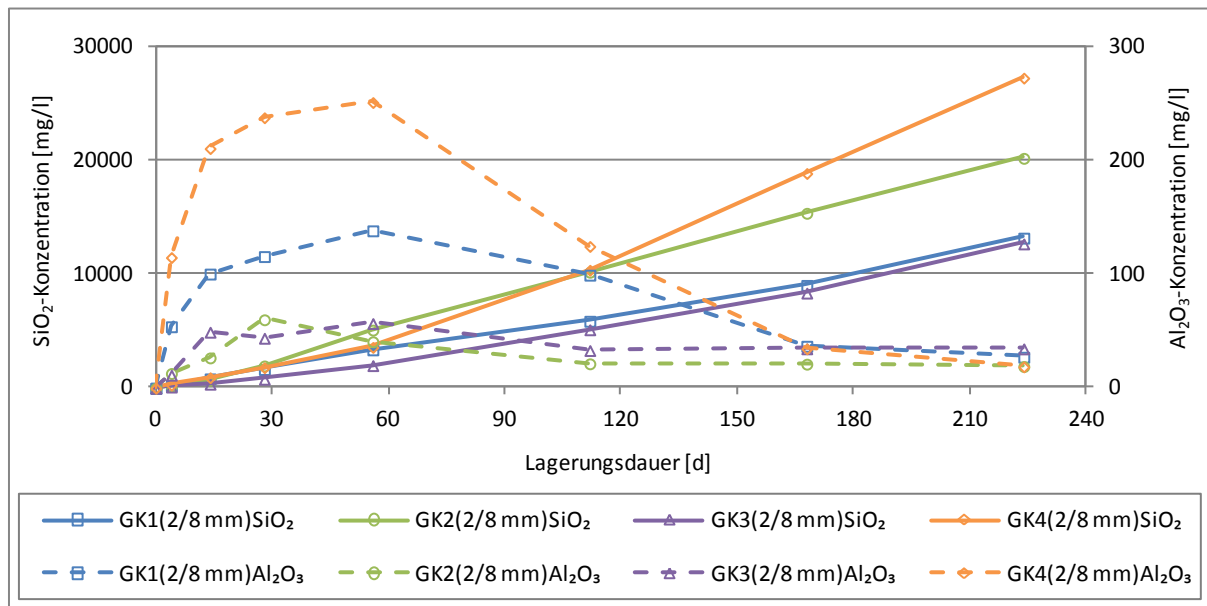


Abbildung 18: SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 60 °C

Die Graphen der SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen zeigen bei den Gesteinskörnungen 1 und 3 einen nahezu identischen und linear ansteigenden Verlauf. Auch die Kurve der SiO<sub>2</sub>-Konzentration bei der Gesteinskörnung 2 verläuft prinzipiell ähnlich wie bei den Gesteinskörnungen 1 und 3, jedoch hat die Lösung mit der Gesteinskörnung 2 wesentlich höhere Absolutwerte der SiO<sub>2</sub>-Konzentration. Lediglich der Verlauf der SiO<sub>2</sub>-Konzentration bei der Gesteinskörnung 4 weist einen deutlich größeren Anstieg ab dem 56. Lagerungstag auf. Am letzten Lagerungstag reichen die SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den jeweiligen Lösungen der vier Gesteinskörnungen von 12733 mg/l bis 27362 mg/l. Betrachtet man die Konzentrationen an gelöstem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> der Gesteinskörnungen, fällt auf, dass bei allen Lösungen der Gesteinskörnungen anfänglich ein relativ starker Anstieg der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration zu verzeichnen ist und danach die Konzentration an gelöstem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bei allen Gesteinskörnungen bis zum 168. Lagerungstag auf unter 50 mg/l abfallen, also ein Maximum der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration in der Lösung auftritt. Die Lösung mit der Gesteinskörnung 4 erreicht am 56. Lagerungstag mit 252 mg/l die höchste Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration, gefolgt von der Lösung mit der Gesteinskörnung 1 mit 139 mg/l. Die Kurven der Konzentration an gelöstem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verlaufen bei den Gesteinskörnungen 2 und 3 fast identisch und haben einen Maximalwert von rund 60 mg/l.

Der Vergleich der Ergebnisse der 60 °C-Löseversuche mit den Löseversuchen bei 40 °C stellt wesentliche Unterschiede heraus. Als erstes ist bei 60 °C die hohe Zunahme der SiO<sub>2</sub>-Konzentration anzumerken. Bei beiden Temperaturbedingungen wird kein Maximum der SiO<sub>2</sub>-Konzentration erreicht, was einen Vergleich nur an einem bestimmten Lagerungstag ermöglicht. Die maximale Lagerungsdauer bei 60 °C beträgt 224 Tage. Dies soll der Vergleichszeitpunkt der SiO<sub>2</sub>-Konzentration sein. Bei der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration wird kein Zeitpunkt sondern das Maximum innerhalb der Lagerungsdauer als Vergleichswert genommen, da bei der 60 °C-Lagerung die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration bei circa 56 Tagen ein Maximum erreicht, wogegen bei 40 °C zu dieser Lagerungsdauer die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration noch wesentlich ansteigt. Eine Übersicht dazu gibt die Gegenüberstellung der Ergebnisse in der Tabelle 10.

Tabelle 10: Gegenüberstellung der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 40 °C und 60 °C

Gesteinskörnung	$\text{SiO}_2$ bei 40 °C/ 224 d	$\text{SiO}_2$ bei 60 °C/ 224 d	Faktor	$\text{Al}_2\text{O}_3$ bei 40 °C/ max.	$\text{Al}_2\text{O}_3$ bei 60 °C/ max.	Faktor
GK 1 (2/8 mm)	2364 mg/l	13242 mg/l	6	147 mg/l	139 mg/l	0,9
GK 2 (2/8 mm)	1741 mg/l	20283 mg/l	12	63 mg/l	60 mg/l	0,9
GK 3 (2/8 mm)	611 mg/l	12733 mg/l	21	45 mg/l	57 mg/l	1,2
GK 4 (2/8 mm)	1839 mg/l	27362 mg/l	15	291 mg/l	252 mg/l	0,8

Die Tabelle 10 macht deutlich, dass jede Gesteinskörnung unterschiedlich auf die Temperaturerhöhung reagiert. Die Temperatur hat auf die Löslichkeit von Silizium einen sehr starken Einfluss. Die Erhöhung der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in den Lösungen infolge der Temperatursteigerung ist für jede Gesteinskörnung unterschiedlich. Bei der Lösung mit der Gesteinskörnung 3, welche die niedrigste  $\text{SiO}_2$ -Konzentration bei 40 °C aufweist, erhöht sich die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration um das 21-fache durch eine um 20 K erhöhte Temperatur. Dagegen steigert sich die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration bei der Gesteinskörnung 1 nur um das Sechsfache, wobei diese Gesteinskörnung fast die dreifach höhere Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  bei 40 °C gegenüber der Gesteinskörnung 3 besitzt. Die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen bei 60 °C sind somit nicht auf die bei 40 °C ermittelten  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen zu extrapolieren. Durch die Temperaturänderung konnte beispielhaft an den Gesteinskörnungen dargestellt werden, dass jede Gesteinskörnung anders auf Veränderungen reagiert. Somit ändern sich auch die Abstufungen in der Reaktivität der Gesteinskörnung. Betrachtet man allein die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in den Lösungen, dann müsste unter den Bedingungen 60 °C und 1,0 M KOH-Lösung die Gesteinskörnung 4 am reaktivsten sein.

Die Temperaturerhöhung zeigt bei den Maximalwerten der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration keine wesentlichen Veränderungen. Die Abweichungen sind hier auf Toleranzbereiche der Messung zurückzuführen. Jedoch offenbart der Blick auf die Verläufe der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen deutliche Unterschiede, welche durch die Temperaturerhöhung hervorgerufen werden. In der Abbildung 18 sinkt nach dem 56. Lagerungstag die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in den Lösungen merkbar ab. Allerdings konnte dieses Phänomen bei 40 °C auch beobachtet werden. Die Lagerungszeiten betragen dabei jedoch weit über ein Jahr. Durch den Abfall der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in den Lösungen wird auch deutlich, dass neben dem Löseprozess noch weitere Reaktionen stattfinden. Ein besonderes Augenmerk bei der Betrachtung der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration ist wiederum auf die Lösung mit der Gesteinskörnung 4 zu richten. Wie schon bei den 40 °C-Versuchen ersichtlich, scheint auch bei der 60 °C-Lagerung vom aus der Gesteinskörnung gelösten Aluminium eine Beeinflussung der Löslichkeit des Siliziums auszugehen: Ab dem 56. Lagerungstag steigt in der Lösung die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration wesentlich stärker an, wobei gleichzeitig die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration abnimmt.

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass eine Erhöhung der Temperatur um 20 K bei gleichbleibenden sonstigen Randbedingungen nicht ausschließlich zu einer Beschleunigung der Reaktionen führt, sondern diese Reaktionen auch sehr stark verändert werden. Die Auswertung solcher Ergebnisse hinsichtlich einer Empfindlichkeitseinstufung einer Gesteinskörnung wird deutlich in Frage gestellt.

Eine weitere Erhöhung der Temperatur auf 80 °C und gleichbleibender Lagerung in 1,0 M KOH-Lösung macht eine Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen entsprechend des 40 °C-Betonversuchs nach 5.1.1 unmöglich. In der Abbildung 19 sind die Ergebnisse über eine Lagerungsdauer von 56 Tagen abgetragen.

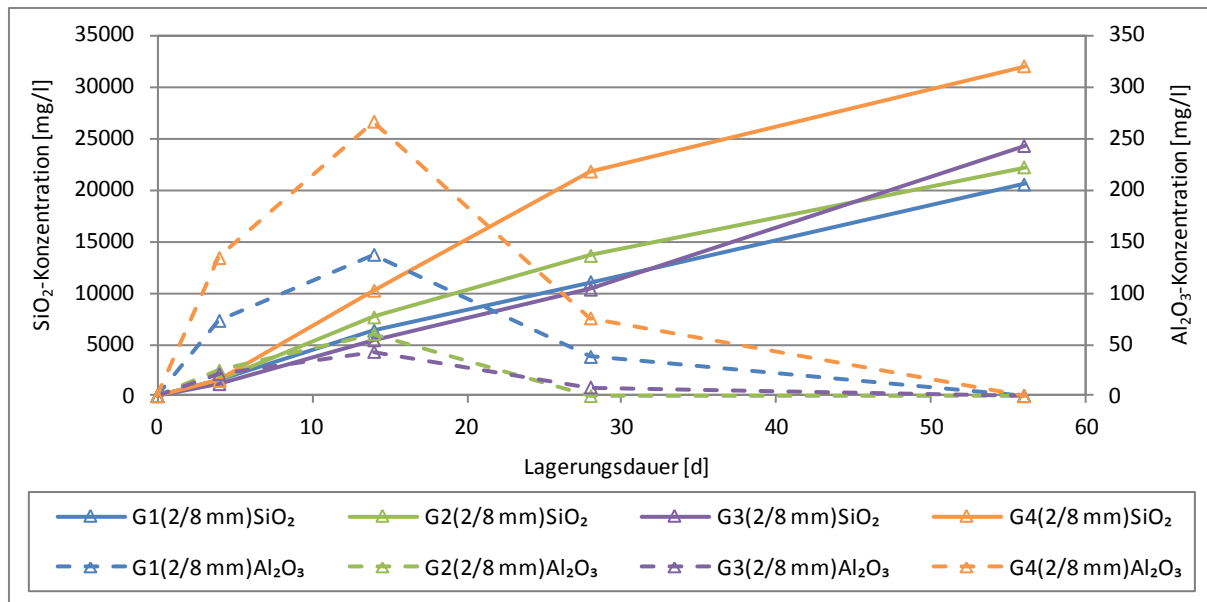


Abbildung 19:  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 80 °C

Betrachtet man die Abbildung 19, fällt zuerst auf, dass zum Ende der Lagerungszeit die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung mit der Gesteinskörnung 4 am höchsten ist. Bei den Gesteinskörnungen 1 und 2 verlaufen die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  sehr ähnlich. Bei der Gesteinskörnung 3, als spät reagierendes Gestein im 40 °C-Betonversuch, zeigt sich bis zum 28. Lagerungstag der kleinste Anstieg der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung. Am 56. Lagerungstag erreicht die Gesteinskörnung 3 bezüglich der Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  wiederum vergleichbare Bereiche wie die Gesteinskörnungen 1 und 2. Obwohl im 40 °C-Betonversuch keine Auffälligkeiten festzustellen sind, ist bei der Betrachtung der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen die Gesteinskörnung 4 im Löseversuch mit 1,0 M KOH-Lösung und 80 °C das reaktivste Material. Allerdings ist dabei die vergleichsweise hohe  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung zu beachten. Interessanterweise verlaufen die Konzentrationen an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei den Gesteinskörnungen relativ gleich, nur die Absolutwerte unterscheiden sich. Bis zum 14. Lagerungstag steigen die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in den Lösungen an und sinken anschließend rapide ab. Hingegen ist bei der Gesteinskörnung 3 eine verlangsamte Abnahme des gelösten  $\text{Al}_2\text{O}_3$  festzustellen. Am 56. Lagerungstag kann kein  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mehr in den Lösungen bestimmt werden. Der Abfall der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration zeigt wie schon bei 60 °C, dass es sich hierbei um keinen reinen Löseprozess handelt, sondern noch weitere Nebenreaktionen stattfinden. Abschließend muss festgehalten werden, dass, ebenso wie bei den Löseversuchen bei 60 °C, keine Übereinstimmung mit der Reaktivitätsabstufung der Gesteinskörnung im 40 °C-Betonversuch besteht. Als Ursache dafür kommt in Frage, dass die  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen durch die Temperaturerhöhung unterschiedlich verändert werden. Für die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in den Lösungen ist eine starke Zunahme mit steigender Lagerungstemperatur festzustellen, wobei jede Gesteinskörnung unterschiedlich auf die Temperaturerhöhung reagiert. In Analogie zur Tabelle 10 werden in der Tabelle 11 die  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen bei 40 °C denen bei 80 °C gegenübergestellt.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 40 °C und 80 °C

Gesteinskörnung	$\text{SiO}_2$ bei 40 °C/ 56 d	$\text{SiO}_2$ bei 80 °C/ 56 d	Faktor	$\text{Al}_2\text{O}_3$ bei 40 °C/ max.	$\text{Al}_2\text{O}_3$ bei 80 °C/ max.	Faktor
GK 1 (2/8 mm)	605 mg/l	20537 mg/l	34	147 mg/l	137 mg/l	0,9
GK 2 (2/8 mm)	255 mg/l	22209 mg/l	87	63 mg/l	60 mg/l	1,0
GK 3 (2/8 mm)	180 mg/l	24281 mg/l	135	45 mg/l	43 mg/l	1,0
GK 4 (2/8 mm)	658 mg/l	32025 mg/l	49	291 mg/l	266 mg/l	0,9

Die Temperaturerhöhung von 40 °C auf 80 °C zeigt, dass die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen um den Faktor 34 bis 135 ansteigen, jedoch die maximalen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen nahezu unverändert bleiben. Wie schon bei 60 °C ist auch bei 80 °C die Gesteinskörnung 3 am stärksten von der Temperaturerhöhung beeinflusst. Der entscheidende Punkt ist, dass mit zunehmender Temperatur festgestellte Unterschiede zwischen den Gesteinskörnungen resultierend aus der 40 °C-Lagerung immer mehr verwischen. Bei 40 °C bleibt die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung ab einem bestimmten Lagerungstag im untersuchten Zeitraum konstant, bei 60 °C und 80 °C sinkt diese nach Erreichen des Maximalwertes. Die Gesteinskörnung 4 ist nur über das Zusammenspiel von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  einzustufen. Diese Zusammenhänge gehen nachweislich bei höheren Temperaturen und gleichbleibender Laugenkonzentration verloren. Diese Ergebnisse erklären jedoch die Dehnungen der Prismen im Schnellprüfverfahren beim Einsatz der vier Gesteinskörnungen. Betrachtet man die Abbildung 11, werden dort ebenfalls Ergebnisse erzielt, die eine Differenzierung der Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit unmöglich macht. Die Abbildung 20 belegt, beispielhaft an der Gesteinskörnung 4, dass unter den erhöhten Temperaturbedingungen von 60 °C und 80 °C bei 1,0 M KOH-Lösung grundsätzlich veränderte Ergebnisse als bei den Lagerungsbedingungen des 40 °C-Betonversuchs erzielt werden und eine Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit nicht möglich ist.

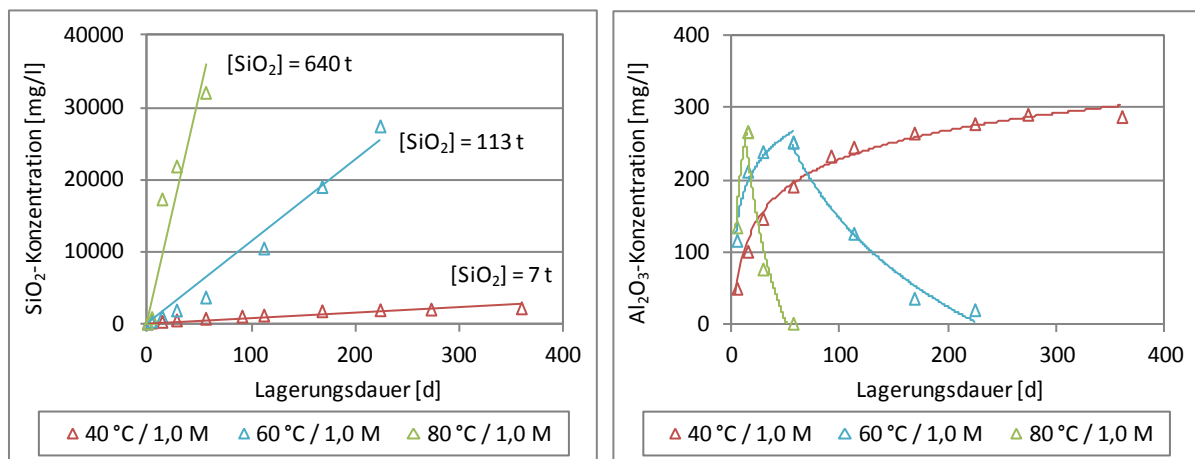


Abbildung 20:  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C, 60 °C und 80 °C

In der Abbildung 20 sind die  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der Lösungen mit der Gesteinskörnung 4 bei 40 °C, 60 °C und 80 °C über die jeweilige Lagerungsdauer abgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Temperatur die Löslichkeit von  $\text{SiO}_2$  zunimmt. Weiter lassen sich die  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen über die Zeit mit linearen Funktionen hinreichend genau beschreiben, so



dass über den Anstieg der Geraden eine Abschätzung der Reaktionsgeschwindigkeit möglich ist. Eine Erhöhung der Lagerungstemperatur von 40 °C auf 60 °C steigert die Reaktionsgeschwindigkeit um das 16fache. Bei einer weiteren Zunahme der Lagerungstemperatur um 20 K vervielfacht sich die Reaktionsgeschwindigkeit nochmals um das Sechsfache. Durch die Temperaturerhöhung von 40 °C auf 80 °C ist nahezu die 100fache Reaktionsgeschwindigkeit zu verzeichnen. Dies gilt jedoch nur für die Gesteinskörnung 4. Für die SiO<sub>2</sub>-Konzentration in den Lösungen der Gesteinskörnungen 1 bis 3 hat die Temperaturerhöhung jeweils eine andere Vervielfachung der Reaktionsgeschwindigkeit zur Folge. Dies zeigt sich im Vergleich der unterschiedlichen Anstiege der Geraden der SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Lösungen der vier Gesteinskörnungen bei verschiedenen Lagerungstemperaturen in der Tabelle 12. Die Löslichkeit von SiO<sub>2</sub> nimmt bei der Gesteinskörnung 1 und 2 weniger stark zu als bei den Gesteinskörnungen 3 und 4. Besonders bei der Temperaturerhöhung von 40 °C auf 80 °C treten deutliche Unterschiede zwischen den mittleren Reaktionsgeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen auf. So multipliziert sich der Anstieg der Geradengleichungen bei den Gesteinskörnungen 1 und 2 mit dem Faktor 39 bzw. 40. Hingegen sind bei der Gesteinskörnung 3 ein Faktor von 140 und bei der Gesteinskörnung 4 ein Faktor von 91 zu bestimmen.

Tabelle 12: Gegenüberstellung der mittleren Reaktionsgeschwindigkeiten der SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C, 60 °C und 80 °C

Gesteinskörnung	Reaktionsgeschwindigkeit bei 40 °C	Reaktionsgeschwindigkeit bei 60 °C	Reaktionsgeschwindigkeit bei 80 °C	Faktor von 40 °C auf 60 °C	Faktor von 40 °C auf 80 °C
GK 1 (2/8 mm)	10 mg/l/d	57 mg/l/d	389 mg/l/d	6	39
GK 2 (2/8 mm)	8 mg/l/d	91 mg/l/d	437 mg/l/d	11	40
GK 3 (2/8 mm)	3 mg/l/d	52 mg/l/d	421 mg/l/d	17	140
GK 4 (2/8 mm)	7 mg/l/d	113 mg/l/d	640 mg/l/d	16	91

Betrachtet man hingegen die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen, so ist festzustellen, dass die absolut gelösten Mengen von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> durch die Temperaturerhöhung nicht zunehmen. Lediglich das Maximum der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration wird zu einem früheren Zeitpunkt erreicht. Die Löslichkeit von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kann bei 40 °C durch eine logarithmische Funktion beschrieben werden. Durch die Steigerung der Lagerungstemperatur sinkt die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration in den Lösungen nach dem Erreichen des Maximums, der Kurvenverlauf ist durch eine negativ logarithmische Funktion zu beschreiben. Weiter ist mit zunehmender Lagerungsdauer kein gelöstes Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mehr in den Lösungen zu finden. Die Abnahme der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration in den Lösungen bedeutet, dass sich schwer lösliche Reaktionsprodukte bilden, deren Struktur aus den durchgeführten Untersuchungen nicht ermittelt werden kann.

Die abgebildeten Ergebnisse zeigen, dass eine Temperaturerhöhung bei gleichbleibender Konzentration der KOH-Lösung nicht ausschließlich zu beschleunigten, sondern auch zu stark veränderten, Löseprozessen des SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aus den untersuchten Gesteinskörnungen und zu weiteren Nebenreaktionen führen. Die Löslichkeit von SiO<sub>2</sub> kann beschleunigt werden. Die Temperatursteigerung führt beim Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zu keiner Erhöhung der Konzentration in der Lösung. Lediglich der Zeitpunkt der maximal löslichen Menge von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird schneller erreicht. Daraus resultiert die Überlegung, im Folgenden die Konzentration der KOH-Lösung zu senken und gleichzeitig die Temperatur auf 80 °C zu erhöhen, um über die Temperatur die gewünschte Beschleunigung zu erzielen. Die beobachteten Lösespezifika aus der Lagerung bei 40 °C und 1,0 M KOH-Lösung sollen dabei unverändert bleiben.

#### 5.3.2.5 Konzentration der alkalischen Lösung

Vorangestellt wird die Verwendung von Kaliumhydroxid anstelle von Natriumhydroxid zur Laugenherstellung erläutert. Die Gründe dafür sind, dass die meisten in Deutschland eingesetzten Portlandzemente wesentlich mehr Kalium als Natrium beinhalten [52] und einige Autoren [40, 48, 116] zeigen, dass Kalium zu deutlich schnelleren Löslichkeiten der Gesteinskörnung führt. Hübert und Hüniger [117] stellen gegenteilige Ergebnisse dar, wonach die Löslichkeit der Gesteinskörnung beim Einsatz von Natriumhydroxid größer als bei Kaliumhydroxid ist. Die Feststellung von Leemann und Lothenbach [31, 119], dass unterschiedliche Kalium- zu Natriumverhältnisse zu abweichenden Dehnungen führen, kann vernachlässigt werden, da dies auf verschiedene Zusammensetzungen der sich bildenden Alkalisilikathydrate und deren Quellverhalten verweist, nicht jedoch auf Unterschiede der gelösten Gesteinskörnungsanteile schließen lässt. Ein weiterer Grund für den Einsatz von Kaliumhydroxid ist wiederum die Vergleichbarkeit zu vorherigen Untersuchungen von Bachmann und anderen [135].

Eine Erhöhung der Laugenkonzentration bei 40 °C ist ebenfalls eine Option zur Beschleunigung der Löseversuche. Die Konzentration der verwendeten KOH-Lösung von 1,0 M entspricht einem pH-Wert von 14. Der Prü fzement nach 4.1.1 besitzt ein aufdotiertes  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,3 M.-%. Die Porenlösung des Zementsteins weist bei einem w/z-Wert von 0,45 nach 90 Tagen eine Hydroxidionenkonzentration von 927 mmol/l auf. Eine noch höhere Alkalität entspricht nicht den in Deutschland verwendeten Portlandzementen [52] und führt zu einer Entfernung von realen Betonsystemen.

Im Folgenden wird die Konzentration der zu verwendenden KOH-Lösung von 1,0 M auf 0,75 M und weiter auf 0,5 M bei gleichbleibenden 80 °C gesenkt, um vergleichbare Ergebnisse wie beim 40 °C-Löseversuch mit 1,0 M KOH-Lösung zu erhalten. In der Abbildung 21 werden die Ergebnisse für die Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 gezeigt, wobei das linke Diagramm eine wiederholte Darstellung der Abbildung 19 ist.

Die Darstellung der Ergebnisse in der Abbildung 21 macht deutlich, dass mit abnehmender Konzentration der KOH-Lösung eine Abnahme der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration einhergeht. Die Maxima der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration sind hingegen weitgehend unabhängig von der Konzentration der KOH-Lösung. Weiter ist festzustellen, dass eine Reduzierung der Konzentration der KOH-Lösung von 1,0 M auf 0,5 M nicht ausreichend ist, um vergleichbare Ergebnisse wie bei der 40 °C-Lagerung (Abbildung 17) zu erzielen. Eine Unterscheidung der Gesteinskörnungen hinsichtlich einer Beurteilung ihrer Alkaliempfindlichkeit ist bei Betrachtung und Auswertung der Abbildung 21 nicht möglich. Eine weitere schrittweise Absenkung der Konzentration der KOH-Lösung auf 0,25 M erscheint bei noch sehr hohen Unterschieden zwischen den Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  der Gesteinskörnungen bei 0,5 M KOH-Lösung nicht zielführend.

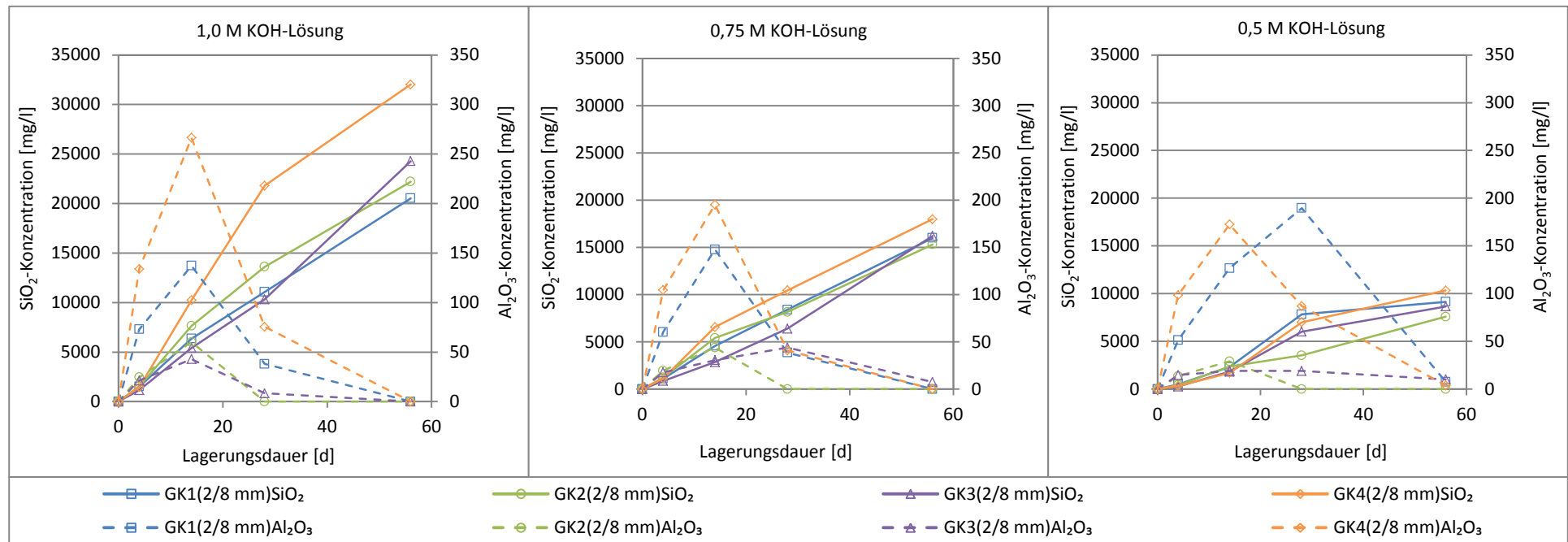


Abbildung 21:  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 bei 80 °C in Abhängigkeit von der KOH-Konzentration (1,0 M bis 0,5 M)

In einem nächsten Schritt wird deshalb die Konzentration der KOH-Lösung auf 0,1 M gesenkt. Bei langjährigen Versuchen des Fachgebiets Baustoffe und Bauchemie der BTU Cottbus - Senftenberg bei 80 °C und 0,1 M KOH-Lösung sowie bei der Anwendung des BTU-SP-Tests haben sich diese Versuchsbedingungen bewährt, um unter anderem an Grauwacken stattfindende Lösereaktionen nachzuweisen [12, 94, 134]. Unter den Randbedingungen 80 °C und 0,1 M KOH-Lösung werden die vier Gesteinskörnungen mit der Korngruppe 2/8 mm über einen Zeitraum von 56 Tagen geprüft. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in der Abbildung 22 dargestellt.

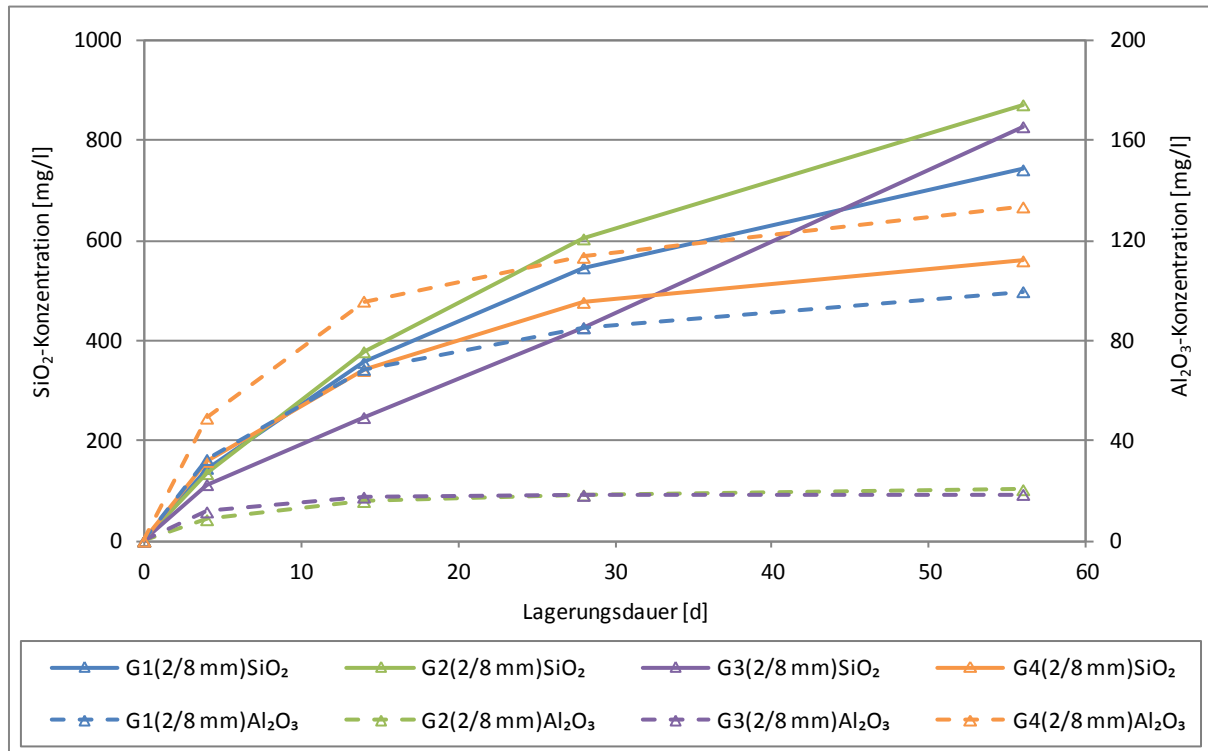


Abbildung 22: SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Die Ergebnisse der Abbildung 22 zeigen, dass aus den Gesteinskörnungen 1 bis 3 kontinuierlich SiO<sub>2</sub> gelöst wird, wobei auffällig ist, dass zum Ende der Lagerung der Anstieg der Konzentrationen an gelöstem SiO<sub>2</sub> bei den Gesteinskörnungen 1 und 2 abnimmt und bei der Gesteinskörnung 3 weiter ansteigt. Bei der Lösung mit der Gesteinskörnung 4 nimmt die SiO<sub>2</sub>-Konzentration nach 28 Tagen nicht mehr signifikant zu. Interessanterweise verläuft hier der Graph der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentration fast identisch mit der Kurve der SiO<sub>2</sub>-Konzentration, wobei die Absolutwerte um das Vierfache geringer sind. Am 56. Lagerungstag erreicht die Konzentration an gelöstem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mit 100 mg/l bei der Gesteinskörnung 1 lediglich 13 % der SiO<sub>2</sub>-Konzentration in der Lösung. Bei den Lösungen der Gesteinskörnungen 2 und 3 bleiben die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen gering und erreichen Maximalwerte von etwa 20 mg/l.

Entscheidend bei der Betrachtung der Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C ist, dass die Gesteinskörnungen, vergleichbar wie bei der Lagerung in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C (Abbildung 17), deutliche Unterschiede in den Konzentrationsverläufen wie auch in den Absolutwerten des gelösten SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aufweisen. Die Lösungen mit den Gesteinskörnungen 1 und 2 verzeichnen über die gesamte Lagerungsdauer sehr hohe SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Bei der Lösung mit der Gesteinskörnung 3 ist solch eine hohe

$\text{SiO}_2$ -Konzentration erst am 56. Lagerungstag zu ermitteln. Die Gesteinskörnung 4 liefert zwar anfänglich eine vergleichbare Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  wie die Gesteinskörnungen 1 und 2, jedoch setzt hier zum Ende der Lagerungsdauer eine Abflachung der Lösekurve ein. Weiterhin ist bei der Gesteinskörnung 4 die höchste Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zu messen, so dass hier von einem Einfluss des Aluminiums auf die stattfindenden Löseprozesse und somit von einer Bindung bzw. Blockierung des Siliziums ausgegangen werden kann, ähnlich wie es unter den Bedingungen 40 °C und 1,0 M KOH-Lösung postuliert werden konnte.

Diese Unterschiede im Löseversuch machen es möglich, die vier Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Reaktivität zu unterscheiden und mit den Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs zu korrelieren. Durch die Erhöhung der Temperatur von 40 °C auf 80 °C und die gleichzeitige Absenkung der Konzentration der KOH-Lösung von 1,0 M auf 0,1 M ist es möglich, vergleichbare Aussagen über stattfindende Lösevorgänge in kürzerer Zeit zu treffen. Um das zu verdeutlichen, werden im Folgenden die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs mit Nebelkammerlagerung und die gewichteten  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der Löseversuche bei 80 °C und 0,1 M KOH-Lösung verglichen. Um die gewichteten Konzentrationen zu ermitteln, werden die Löseversuche auch an der Korngruppe 8/16 mm durchgeführt, welche neben der Korngruppe 2/8 mm ebenfalls beim 40 °C-Betonversuch eingesetzt wird. Die Ergebnisse der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 sind in der Abbildung 23 dargestellt.

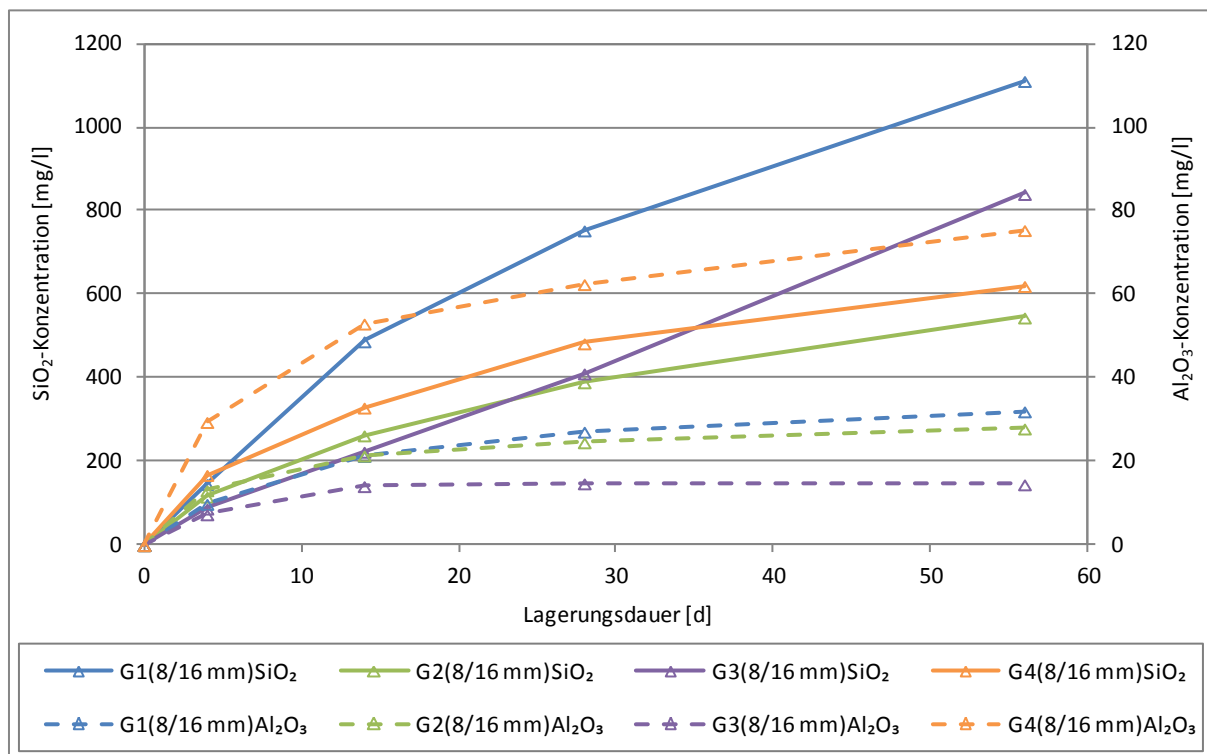


Abbildung 23:  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Im Vergleich zur Korngruppe 2/8 mm (Abbildung 22) sind auch bei der Korngruppe 8/16 mm (Abbildung 23) deutliche Unterschiede im Löseversuch der Gesteinskörnungen festzustellen. Die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung mit der Gesteinskörnung 1 nimmt signifikant über die gesamte Lagerungsdauer zu und erreicht nach 56 Tagen 1111 mg/l. Die Lösung mit der Gesteinskörnung 3 zeigt zum Ende der Lagerungszeit einen deutlichen Anstieg der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration auf 841 mg/l. Die Lö-

sungen mit den Gesteinskörnungen 2 und 4 haben fast gleiche Kurvenverläufe der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen. Bei der reinen Betrachtung der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen wäre eine Differenzierung wiederum schwer möglich. Auch hier ist auf die stark erhöhte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Lösung mit der Gesteinskörnung 4 hinzuweisen, wodurch eine Selbstinhibierung der Gesteinskörnung anzunehmen ist. Durch neueste Veröffentlichungen [69, 67] wird belegt, dass das Aluminium aus Zusatzstoffen eine inhibierende Wirkung auf eine AKR hat. Die Löseuntersuchungen besonders an der Gesteinskörnung 4 zeigen, dass auch von aus der Gesteinskörnung herausgelöstem Aluminium eine Vermeidung, sprich eine Selbstinhibierung, ausgeht [79].

Es stellt sich auch bei der Löseanalyse der Gesteinskörnungen in der Korngruppe 8/16 mm eine Übereinstimmung mit dem 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung heraus. Wie schon oben beschrieben, sollen im Folgenden die gewichteten Konzentrationen von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dargestellt werden. Erst dadurch kann in der Gegenüberstellung mit dem 40 °C-Betonversuch bestätigt werden, dass eine Unterscheidung der vier Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Reaktivität durch den beschleunigten Löseversuch bei 80 °C und 0,1 M KOH-Lösung möglich ist. Die Abbildung 24 zeigt die gewichteten Ergebnisse der Löseversuche.

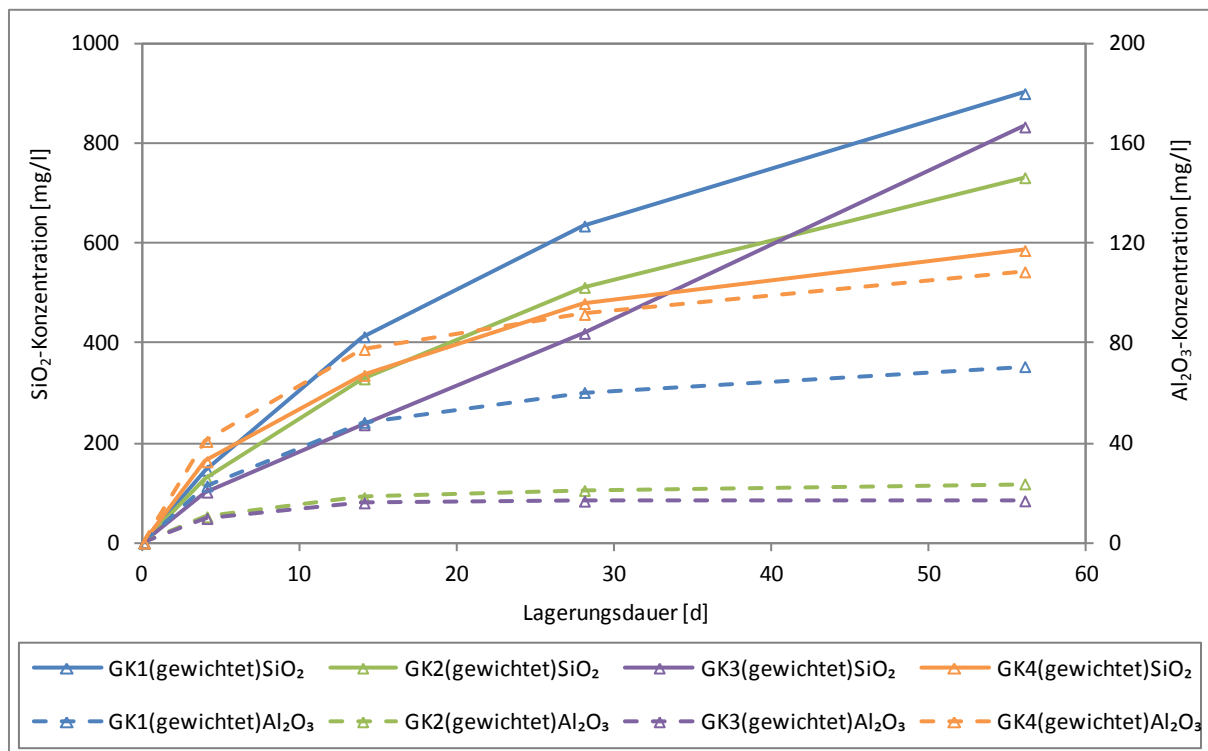


Abbildung 24: Gewichtete  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Betrachtet man die gewichteten  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in der Abbildung 24 erscheint eine Differenzierung der Gesteinskörnungen hinsichtlich Ihrer Reaktivität entsprechend des 40 °C-Betonversuchs diffizil. Zieht man jedoch die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen und die Konzentrationsverläufe in Abhängigkeit von der Zeit in die Betrachtung mit ein, ergibt sich eine deutliche Abstufung der Reaktivität der Gesteinskörnungen. Angefangen bei der Gesteinskörnung 1, welche die höchste Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  aufweist, ist hier eine hohe Enddehnung der Balken von 1,33 mm/m zu messen. Die anrechenbare  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration von 71 mg/l bei 56 Tagen ist nicht ausreichend, um die schädigende AKR zu inhibieren. Anders bei der Gesteinskörnung 4: Trotz der erhöhten  $\text{SiO}_2$ -Konzentration von

586 mg/l in der Lösung am 56. Lagerungstag verhindert die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration von 109 mg/l eine Betonschädigung. Darüber hinaus ist beim Löseversuch dieser Gesteinskörnung auffällig, dass der Anstieg der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration über die Lagerungszeit kontinuierlich geringer wird. Im umgekehrten Fall eines zunehmenden Anstiegs der Konzentration an gelöstem  $\text{SiO}_2$  über die Lagerungszeit wie bei der Gesteinskörnung 3 hat das eine verspätete Reaktion im 40 °C-Betonversuch zur Folge. Durch die relativ hohe  $\text{SiO}_2$ -Konzentration am 56. Lagerungstag von 833 mg/l in der Lösung ist eine Rissweite am Würfel von 0,5 mm nach einem Jahr im 40 °C-Betonversuch erklärbar. Dabei kann der Einfluss der sehr geringen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration von 17 mg/l nur marginal sein. Auch bei der Gesteinskörnung 2 sind deutliche Betonrisse am Würfel festzustellen. Diese treten jedoch nach einigen Monaten und somit deutlich zeitiger als bei der Gesteinskörnung 3 auf, was durch den Löseversuch zu belegen ist: Die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration verzeichnet einen schnellen Anstieg und erreicht am 56. Lagerungstag 731 mg/l. Von der vielfach geringeren  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration von 24 mg/l ist eine inhibierende Wirkung nicht zu erwarten.

Wie die Abbildung 24 und die dargestellten Ergebnisse zeigen, ist es möglich, den 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung und den Löseversuch bei 80 °C und 0,1 M KOH-Lösung hinsichtlich einer Reaktivitätsabstufung der Gesteinskörnungen abzugleichen. Es ist nun gelungen, bei veränderten Bedingungen durch die erhöhte Temperatur auf 80 °C und einer abgesenkten Konzentration der KOH-Lösung auf 0,1 M den Löseversuch zu beschleunigen, ohne dabei die Gesteinsspezifika im Alkalischen zu verändern. Damit können weiterhin übereinstimmende Ergebnisse zum 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung erzielt werden. Die Charakteristik des Löseversuchs einer Gesteinskörnung soll im nächsten Schritt in Werteparametern gefasst werden, um darüber eine Beschreibung der Reaktivität der Gesteinskörnung im 40 °C-Betonversuch zu ermöglichen.

### 5.3.3 Parameter der Löseversuche zur Beschreibung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung

#### 5.3.3.1 Bestimmung an überschüssigen $\text{SiO}_2$ in der Lösung

An den präkambrischen Grauwacken ist es Hill in seiner Arbeit [94] gelungen, eine Einstufung in Alkaliempfindlichkeitsklassen durch eine direkte Prüfung am Korn innerhalb von 14 Tagen vorzunehmen. Dabei weist er nach, dass ein bestimmter Anteil des gelösten Siliziums durch das ebenfalls im Alkalischen aus der Gesteinskörnung herausgelöste Aluminium aluminosilikatisch gebunden wird und somit nicht mehr an einer AKR im Beton schädigend wirkt. Den verbleibenden Anteil an  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiO}_{2\text{üb}}$ ) definiert Hill empirisch wie folgt:

$$\text{SiO}_{2\text{üb}} = \text{SiO}_{2\text{ges}} - 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}} \quad (7)$$

Der Bindungsfaktor von 1,4 von Hill entspricht annähernd dem molaren Bindungsfaktor von Silizium zu Aluminium von 1:1. Nach der Löwenstein-Regel ist kein geringeres Bindungsverhältnis möglich [97]. Gleiche oder höhere Verhältnisse von Silizium zu Aluminium sind in der Literatur mehrfach beschrieben [96, 98, 99, 100]. Demnach ist der Bindungsfaktor von 1,4 bei oxydischer Angabe von Silizium und Aluminium nach der Gleichung (7) eine auf der sicheren Seite liegende Annahme für aluminosilikatische Komplexbildungsprozesse.

Aus dem mathematischen Zusammenhang der Gleichung (7) ergeben sich drei Wertebereiche für den  $\text{SiO}_2$ -Überschuss:

$\text{SiO}_{2\text{üb}} > 0$	$\text{SiO}_{2\text{ges}} > 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}}$	Es ist ein Überschuss an $\text{SiO}_2$ in der Lösung. $\text{SiO}_2$ steht für eine mögliche AKR zur Verfügung.
$\text{SiO}_{2\text{üb}} = 0$	$\text{SiO}_{2\text{ges}} = 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}}$	Die Menge an gelöstem $\text{SiO}_2$ wird vollständig aluminosilikatisch gebunden.
$\text{SiO}_{2\text{üb}} < 0$	$\text{SiO}_{2\text{ges}} < 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}}$	Es ist ein Überschuss an $\text{Al}_2\text{O}_3$ in der Lösung. Die Menge an gelöstem $\text{SiO}_2$ wird vollständig aluminosilikatisch gebunden.

Die Ergebnisse der Löseversuche an den vier Gesteinskörnungen haben gezeigt, dass mit einem Untersuchungszeitraum der Löseversuche von 56 Tagen die makroskopischen Veränderungen des auf ein Jahr erweiterten 40 °C-Betonversuchs erklärt werden können. Entsprechend werden 56 Tage im Löseversuch 360 Tagen beim verlängerten 40 °C-Betonversuch gleichgesetzt. In der Abbildung 25 sind die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs dem überschüssigen  $\text{SiO}_2$  des 80 °C-Löseversuchs in 0,1 M KOH-Lösung der Gesteinskörnungen 1 bis 4 gegenübergestellt. Das überschüssige  $\text{SiO}_2$  wurde dabei aus den  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der Lösungen der geprüften Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm berechnet und gewichtet.

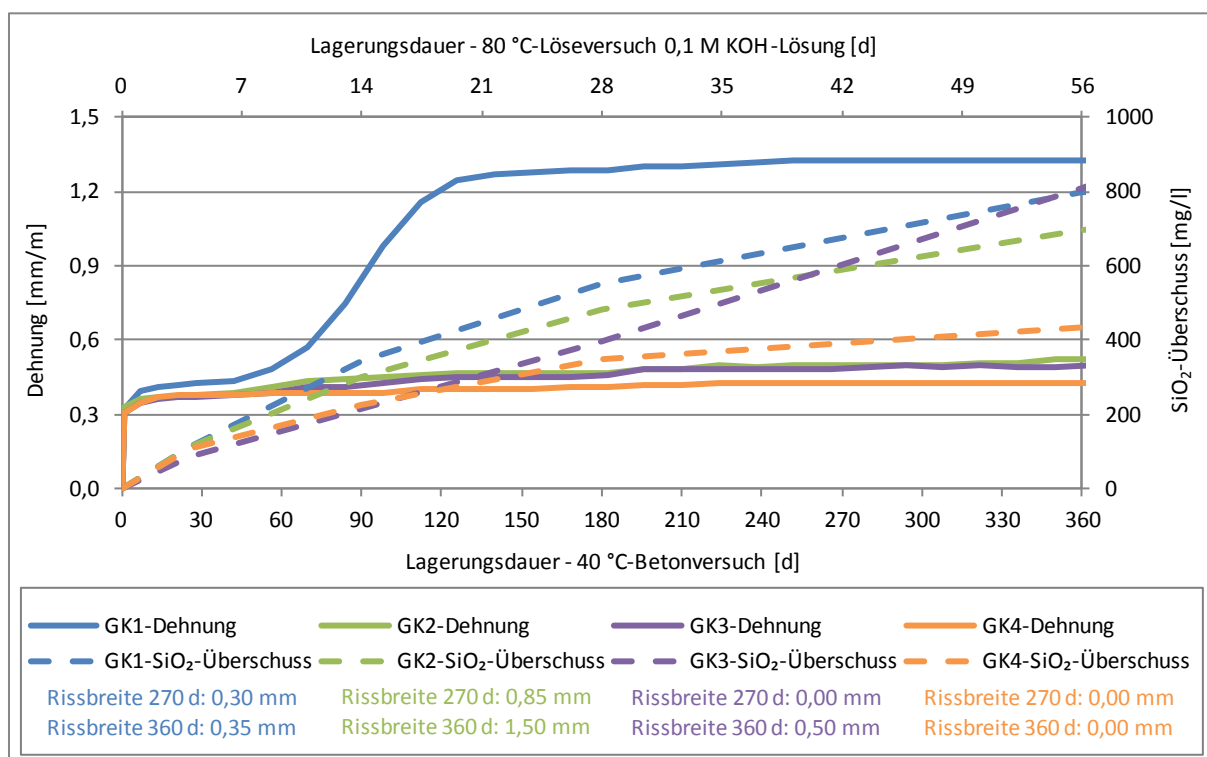


Abbildung 25: Gegenüberstellung - Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs und gewichteter  $\text{SiO}_2$ -Überschuss des Löseversuchs in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Betrachtet man die  $\text{SiO}_2$ -Überschüsse in der Abbildung 25 fällt auf, dass die Lösungen mit den Gesteinskörnungen 1 und 2 nahezu den gleichen  $\text{SiO}_2$ -Überschuss haben. Die Gesteinskörnung 3 weist am 56. Lagerungstag mit 810 mg/l genau so viel  $\text{SiO}_2$ -Überschuss in der Lösung auf wie die Gesteinskörnungen 1 und 2, jedoch ist hier der Verlauf genauer zu bewerten. Der Anstieg ist in den ersten Lagerungstagen geringer und erreicht erst zum Lagerungsende den hohen  $\text{SiO}_2$ -Überschuss in der Lösung. Deutliche Unterschiede zeigen sich lediglich bei der Gesteinskörnung 4, bei welcher das überschüssige  $\text{SiO}_2$  in der Lösung sichtbar reduziert wird und zum Ende der Lagerungsdauer die Kon-



zentration an überschüssigen  $\text{SiO}_2$  fast konstant ist. Die Abbildung 25 stellt deutlich heraus, dass eine Einstufung der Alkaliempfindlichkeit nach einer kürzeren Lagerungsdauer von 14 Tagen teilweise zu einer Fehleinschätzung führen kann. Besonders die später reagierende Gesteinskörnung 3 zeigt zu diesem Zeitpunkt ein ähnliches Ergebnis wie die nicht reaktive Gesteinskörnung 4. Schlussfolgernd kann allein aus der Bewertung des überschüssigen  $\text{SiO}_2$  in der Lösung an einem bestimmten Lagertag keine Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen erfolgen.

### 5.3.3.2 Bestimmung der Lösegeschwindigkeit

Eine AKR im Beton ist ein dynamischer Prozess. Somit muss das überschüssige  $\text{SiO}_2$  in Abhängigkeit von der Zeit betrachtet werden. Die Gleichung (8) bildet die Lösegeschwindigkeit des überschüssigen  $\text{SiO}_2$  in der Lösung ab, wodurch eine Beschreibung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung möglich ist.

$$V_{\Delta\text{SiO}_2\text{-Überschuss}/\Delta t} = \frac{\Delta\text{SiO}_2 - 1,4 \cdot \Delta\text{Al}_2\text{O}_3}{\Delta t} \quad (8)$$

In der Gleichung (8) sind die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus dem Löseversuch von Gesteinskörnungen als gegeben anzunehmen. Unbekannt ist die Zeit, um die Geschwindigkeit zu bestimmen. Eine einfache Annahme einer kontinuierlichen Lösegeschwindigkeit über die Dauer von 56 Tagen ist auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse auf keine der vier untersuchten Gesteinskörnungen zutreffend. Wie in der Abbildung 25 zu sehen ist, ändert sich an jedem Messtag der Anstieg des Graphen des überschüssigen  $\text{SiO}_2$  und somit auch die Lösegeschwindigkeit. Anhand des Ablaufs der AKR im Beton mit verschiedenen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen sollen im folgenden Kapitel Zeitintervalle festgelegt werden, welche eine Beschreibung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung zu bestimmten Zeitpunkten zulässt. Dabei ist zu klären, ob die gewählten Messtermine ausreichend sind, um die Reaktivität der Gesteinskörnung hinreichend genau zu beschreiben und somit Vorhersagen hinsichtlich des Schädigungspotentials durch den Einsatz der Gesteinskörnung im Beton zu treffen. Das Schädigungspotential wird definiert als Eigenschaft der Gesteinskörnung und hängt von den zeitabhängig gelösten Mengen an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei der Verwendung der Gesteinskörnung im alkalischen Milieu ab. Als betonschädigend wirkt lediglich die überschüssige  $\text{SiO}_2$ -Menge, welche nicht alumosilikatisch gebunden ist. Das Schädigungspotential steigt mit zunehmender Menge des überschüssigen  $\text{SiO}_2$  in Abhängigkeit von der Zeit.

## 5.4 Beitrag der Gesteinskörnung zur AKR im Beton

### 5.4.1 Phasen einer AKR aus der Diskussion von Reaktionsabläufen der Gesteinskörnung

Der Ablauf einer AKR wurde im Kapitel 2 weitgehend beschrieben. Darüber hinaus konnte im Kapitel 5.3.3 gezeigt werden, dass durch die ermittelte Lösegeschwindigkeit der Gesteinskörnung durch den 80 °C-Löseversuch in 0,1 M KOH-Lösung eine AKR entsprechend des 40 °C-Betonversuchs beschrieben werden kann. Auf der Grundlage der zeitabhängigen Auflösung von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus der Gesteinskörnung soll nun der Beitrag der Gesteinskörnung zur AKR im Beton gefasst werden. Flinte und Opalsandsteine können ausreichend genau nach Teil 2 der Alkali-Richtlinie eingestuft werden und bleiben daher unberücksichtigt.

Entsprechend des 40 °C-Betonversuchs sind folgende Bedingungen für die weitere Betrachtung stets gegeben:

- Überschuss an Alkali- und  $\text{OH}^-$ -Ionen in der Porenlösung durch den verwendeten Prüfzement
- Ausreichend Feuchtigkeit durch 100 % relative Feuchte

Jede Gesteinskörnung verursacht im 40 °C-Betonversuch eine spezifische Dehnungs- bzw. Rissbreitenentwicklung der Probekörper, was auf Unterschiede bei der partiellen Auflösung der Gesteinskörnungen im alkalischen Milieu zurückzuführen ist. Da sich jede Gesteinskörnung unterschiedlich im alkalischen Milieu löst, werden nachfolgend drei verschiedene Reaktionsabläufe einer AKR im 40 °C-Betonversuch, bezogen auf die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung, unterschieden. Es werden jeweils 4 zeitlich aufeinanderfolgende Phasen betrachtet. Die Zeitangaben sind Richtwerte und variieren für jede Gesteinskörnung.

AKR - klassisch (Gesteinskörnung 1 und 2):

0. Phase: Der Beton zeigt keine Schädigung im ersten Monat.
1. Phase: Vom ersten bis zum dritten Monat ist das Schädigungspotential hoch. Es sind erste Veränderungen des Betongefüges zu beobachten.
2. Phase: In den Monaten vier bis sechs ist ausreichend Schädigungspotential vorhanden. Es ist eine fortschreitende Dehnung- bzw. Rissbreitenentwicklung zu dokumentieren.
3. Phase: Bis zum Ende des Betonversuchs ist das Schädigungspotential verbraucht. Die Dehnung oder Rissbreite erreicht einen Endwert.

AKR - spät reagierend (Gesteinskörnung 3):

0. Phase: Der Beton zeigt keine Schädigung im ersten Monat.
1. Phase: Vom ersten bis zum dritten Monat ist wenig Schädigungspotential vorhanden. Es treten nur geringe Veränderungen der Betonmatrix auf.
2. Phase: In den Monaten vier bis sechs ist ausreichend Schädigungspotential vorhanden. Die Dehnung bzw. Rissbreite nimmt zu.
3. Phase: Das Schädigungspotential ist gleich oder höher wie in der Schädigungsphase 2. Die Dehnung- und Rissbreitenentwicklung ist vergleichbar mit der Schädigungsphase 2.

AKR - nicht schädigend (Gesteinskörnung 4):

0. Phase: Der Beton zeigt keine Schädigung im ersten Monat.
1. Phase: Vom ersten bis dritten Monat ist wenig Schädigungspotential vorhanden. Es zeigen sich keine makroskopischen Veränderungen.
2. Phase: In den Monaten vier bis sechs ist das Schädigungspotential nicht ausreichend. Es treten keine wesentlichen Dehnungen oder Rissbreiten auf.
3. Phase: Das Schädigungspotential ist sehr gering. Dehnungen und Rissbreiten sind deutlich unter den Grenzwerten.

Die vier Phasen einer AKR sind als Zeitabschnitte in die Abbildung 26 eingetragen.

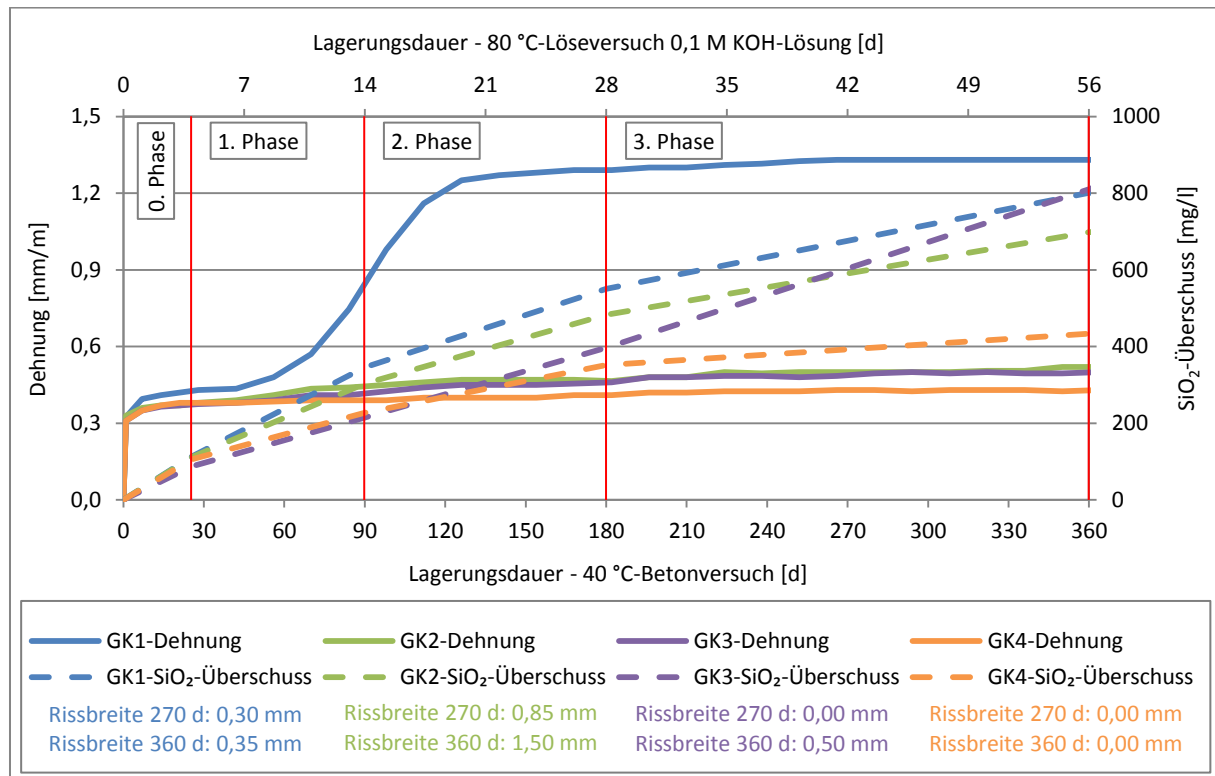


Abbildung 26: Zeitintervalle - Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs und gewichteter SiO<sub>2</sub>-Überschuss des Löseversuchs in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Den Zeitintervallen in der Abbildung 26 werden im Folgenden bestimmte Reaktionen zugeordnet, um den Einfluss des Schädigungspotentials ausgehend vom überschüssigen SiO<sub>2</sub> in der Lösung der Gesteinskörnung beschreiben zu können. Bis zu einem Monat (Phase 0) im 40 °C-Betonversuch ist bei allen vier Gesteinskörnungen keine Schädigung des Betons festzustellen. Es bilden sich vermehrt C-S-H-Phasen, in denen überschüssiges SiO<sub>2</sub> eingebaut wird. Durch die zusätzliche Einbindung von Silizium in die C-S-H-Phasen wird das Ca/Si-Verhältnis verringert und mehr Alkalien können in die C-S-H-Phasen eingebunden werden [57, 58], wodurch die Alkalität der Porenlösung sinkt [61]. Weiter trägt das verfügbare SiO<sub>2</sub> durch die Bildung von C-S-H-Phasen zur Festigkeitsentwicklung und zur Verminderung der Betonporosität bei. Allerdings erhöht sich ebenso die Frühfestigkeit des Betons. Als Folge vermindert sich die Verformbarkeit des Betons vorzeitig und eine stattfindende AKR wäre schneller schädlich. Jedoch findet eine C-S-H-Bildung bevorzugt statt und verhindert somit die Bildung von Alkalisilikathydraten [46, 64].

Nach etwa 28 Tagen ist ein Großteil der Zementhydratation im Beton unter den Bedingungen der Nebelkammerlagerung abgeschlossen. Der inhibierende Einfluss der C-S-H-Phasen-Bildung wird somit geringer. Ausgehend davon, dass genügend Alkali- und Calciumionen in der Porenlösung vorhanden sind und Calcium aus dem Zementstein in Lösung geht, bilden sich zusammen mit SiO<sub>2</sub> quellfähige Gelstrukturen [31, 47]. Durch die Aufnahme von Wasser kommt es zur Dehnung der Alkalisilikathydrate. Dies führt jedoch nicht zwangsläufig zu Schäden des Betons, da die Alkalisilikathydrate zuerst vorhandene Porenräume des Betongefüges [42, 43] bzw. der Gesteinskörnung [137] ausfüllen. Anschließend muss die Zugfestigkeit des Betons durch den Expansionsdruck der Alkalisilikathydrate überschritten werden, damit es zu Dehnungen oder Rissen der Betonmatrix kommt. Folglich ist in der Phase 1 das überschüssige SiO<sub>2</sub> aus der Gesteinskörnung nicht vollständig für die Schädigung infolge einer AKR anzurechnen. Als Anhaltspunkt kann eine Gesteinskörnung als nicht reaktiv eingestuft werden, wenn die Konzentration des überschüssigen SiO<sub>2</sub> in der Lösung weniger als 100 mg/l beträgt.

Dies geht aus den Ergebnissen des BTU-SP-Tests [135] und bisherigen Löseuntersuchungen unter diesen Bedingungen hervor.

In der Phase 2 bildet das überschüssige  $\text{SiO}_2$  zusammen mit den Alkalien aus dem Zementstein weiterhin Alkalisilikathydrate, wodurch die Schädigung des Betons verstärkt wird. Die Höhe der Schädigung ist nicht nur abhängig von der Menge des zur Verfügung stehenden  $\text{SiO}_2$  aus der Phase 2 sondern auch von den schon gebildeten Gelen der Phase 1. Denn auch die später gebildeten Alkalisilikathydrate können noch vorhandenen Porenraum ausfüllen. In der Phase 3 findet ebenfalls eine Gelbildung bei überschüssigen  $\text{SiO}_2$  statt und die neu gebildeten Gele können sich auch hier nur schädigungsfrei in nicht gefüllte Porenräume einlagern. Solange  $\text{SiO}_2$  zur Verfügung steht, bilden sich neue Alkalisilikathydrate. Die Alkalien dafür können nach Wieker und anderen [47] auch aus alten Gelen wieder freigesetzt werden und mit noch ungebundenen  $\text{SiO}_2$  neue Gele bilden. Für alle Phasen gilt: Solange nicht genügend überschüssiges  $\text{SiO}_2$  verfügbar ist, bilden sich keine Alkalisilikathydrate.

Die vorgegebenen Zeitfenster bei verschiedenen reaktiven Gesteinskörnungen stellen mehrere Phasen des 40 °C-Betonversuchs dar, welche repräsentativ für den Ablauf der Hydratation des Betons und der stattfindenden AKR sind. Die beiden Konkurrenzreaktionen C-S-H-Phasen-Bildung und AKR werden wesentlich durch das überschüssige  $\text{SiO}_2$  der Gesteinskörnung beeinflusst. Entscheidend für den Verlauf der AKR ist dabei, zu welchem Zeitpunkt wie viel ungebundenes  $\text{SiO}_2$  für Reaktionen zur Verfügung steht. Die zeitliche Gliederung der Phasen entspricht dem typischen Verlauf einer klassischen AKR unter Verwendung der Gesteinskörnungen 1 und 2. Es zeigt sich, dass die Zeitintervalle auch auf die spät reagierende Gesteinskörnung 3 und die alkaliunempfindliche Gesteinskörnung 4 angewandt werden können.

#### 5.4.2 Lösegeschwindigkeiten zur Beschreibung von Reaktionsabläufen der Gesteinskörnung

Es konnte gezeigt werden, dass eine Lagerungsdauer von 56 Tagen beim 80 °C-Löseversuch mit 0,1 M KOH-Lösung die makroskopischen Veränderungen des 40 °C-Betonversuchs (360 Tage) nachstellt. Die Messtermine nach 4, 14, 28 und 56 Tagen der Löseversuche entsprechen demnach etwa den Zeitintervallen des 40 °C-Betonversuchs (siehe Abbildung 26) und stellen charakteristische Punkte der Lösekurven dar. Eine höhere Dichte der Messtermine hätte möglicherweise eine Negativeinwirkung auf die Verlässlichkeit der Methode, da durch das seltene Öffnen der Gefäße zur Entnahme des Eluats die Fehlereinwirkung minimiert ist. Weiter stellt sich durch eine Verkürzung der Messintervalle kein Mehrwert für die Beschreibung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung heraus, sondern führt lediglich zu Mehrkosten durch den gesteigerten Analyseaufwand. Folglich sind die vier Messtermine ein optimiertes Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen.

Es ergeben sich vier Zeitintervalle über die gesamte Lagerungsdauer im Löseversuch:

- Phase 0: 0 bis 4 Tage
- Phase 1: 4 bis 14 Tage
- Phase 2: 14 bis 28 Tage
- Phase 3: 28 bis 56 Tage

Nach der Gleichung (8) werden nun die Lösegeschwindigkeiten für die vier Gesteinskörnungen ermittelt. In der Abbildung 27 sind jeweils die Ergebnisse der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm sowie die daraus gewichteten Lösegeschwindigkeiten entsprechend des 40 °C-Betonversuchs abgetragen. Über der Gesteinskörnungsbezeichnung befindet sich die grafische Darstellung, darunter sind die Lösegeschwindigkeiten zusätzlich als Absolutwerte vermerkt.

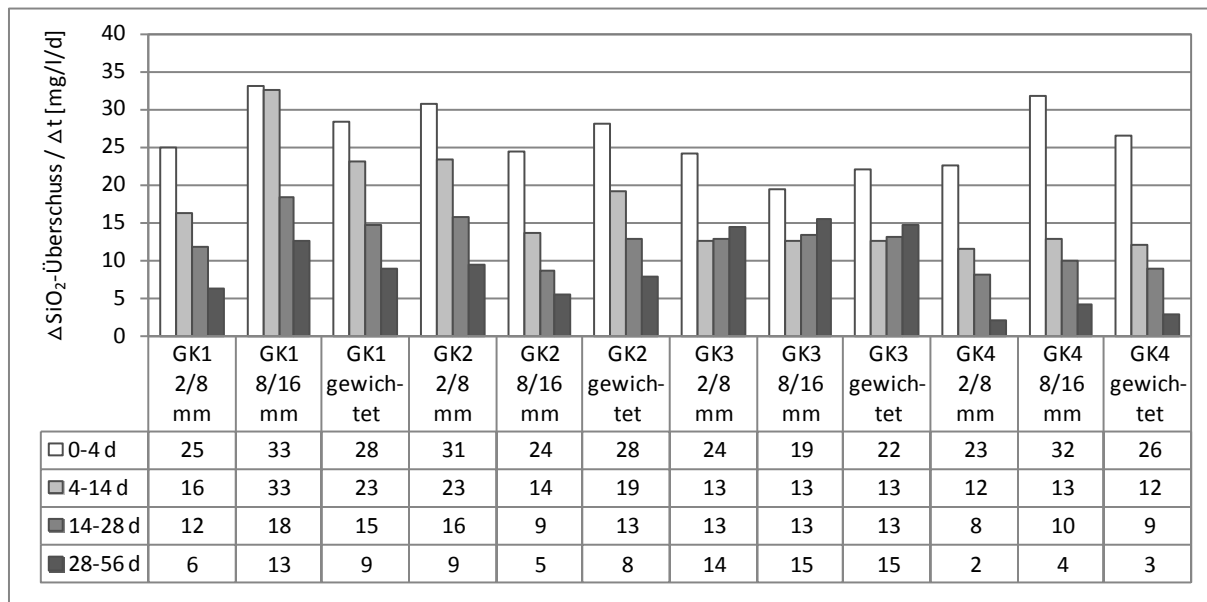


Abbildung 27: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in den Phasen 0 bis 3

Auf Grund der nahezu gleichen Kurvenverläufe der Gesteinskörnungen 1 und 2 in der Abbildung 26 stellt sich in der Abbildung 27 ein ebenfalls vergleichbares Balkendiagramm der gewichteten Lösegeschwindigkeiten dar. Auffällig ist auch hier, dass die Analysen der einzelnen Korngruppen durchaus Unterschiede in der Reaktivität aufweisen. Eine Beurteilung der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 1 fällt positiver aus als die Beurteilung der Korngruppe 8/16 mm der gleichen Gesteinskörnung. Unterschiede in der Reaktivität der Korngruppe bleiben durch eine gemeinsame Prüfung im Schnellprüfverfahren oder 40 °C-Betonversuch nach der Alkali-Richtlinie [4] unberücksichtigt. Bei der Gesteinskörnung 2 sind die Balkendiagramme der Korngruppen ähnlich, was auf eine gleiche Reaktivität schließen lässt. Dennoch ist es notwendig, die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm gewichtet darzustellen, um eine Korrelation zum 40 °C-Betonversuch zu erreichen.

Die makroskopischen Veränderungen des 40 °C-Betonversuchs sind durch die Lösegeschwindigkeiten des 80 °C-Löseversuchs in 0,1 M KOH-Lösung nachvollziehbar und anschaulich zu erfassen. Die Lösungen der Gesteinskörnungen 1 und 2 weisen besonders in den ersten drei Intervallen hohe Lösegeschwindigkeiten auf, wobei mit zunehmender Lagerungszeit die Lösegeschwindigkeit abnimmt. So sind die hohen und schnell einsetzenden Balkendehnungen bzw. Würfelrissbreiten des 40 °C-Betonversuchs zu erklären. Hingegen zeigt sich bei der Gesteinskörnung 3 eine stetige Zunahme der Lösegeschwindigkeit, wodurch im letzten Intervall eine vergleichbar hohe Lösegeschwindigkeit wie bei den schneller reagierenden Gesteinskörnungen 1 und 2 vorhanden ist. Es wird hier noch sehr viel überschüssiges SiO<sub>2</sub> gelöst, welches die hohe Rissbreite von 0,5 mm bewirkt. Entsprechend des 40 °C-Betonversuchs weist die Gesteinskörnung 4 wesentlich geringere Lösegeschwindigkeiten im Balkendiagramm als die anderen Gesteinskörnungen auf. Mit zunehmender Lagerungszeit verringert sich die Lösegeschwindigkeit und dadurch sind keine schädigenden Merkmale im 40 °C-Betonversuch festzustellen. Besonders bei der Gesteinskörnung 4 fällt die hohe Lösegeschwindigkeit in der Phase 0 vergleichend zu den folgenden Phasen auf. In der Phase 0 wird überschüssiges SiO<sub>2</sub> in C-S-H-Phasen eingebaut und ist somit nicht schädigend gebunden. Im Kapitel 7 wird der Einfluss einer hohen Lösegeschwindigkeit in der Phase 0 auf den Ablauf einer AKR bei Verwendung von Zusatzstoffen vertiefend diskutiert. Die Phase 0 ist für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit einer

Gesteinskörnung nicht relevant. Eine um die Phase 0 gekürzte Darstellung der Ergebnisse zeigt die Abbildung 28.

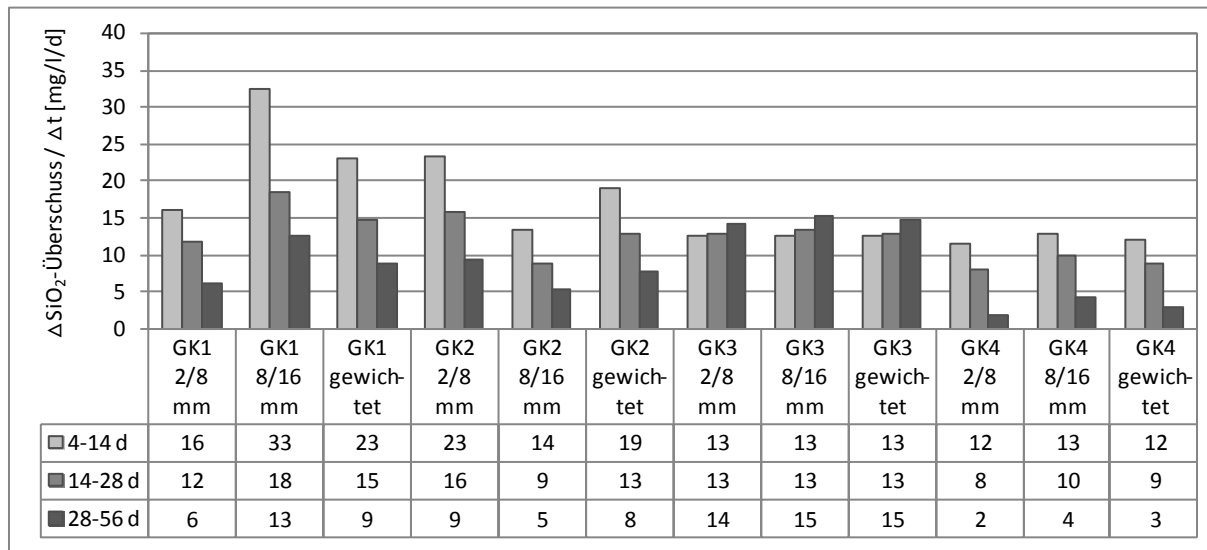


Abbildung 28: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in den Phasen 1 bis 3

Es ist sofort erkennbar, dass durch den Verzicht der Darstellung der schädigungsfreien Phase 0 in der Abbildung 28 eine wesentlich bessere Beurteilung der Gesteinskörnungen erfolgen kann. Es sollen vorerst die gewichteten Lösegeschwindigkeiten betrachtet werden, um daran den Beitrag der Gesteinskörnungen 1 bis 4 zur AKR darzulegen. Die Gesteinskörnung 1 und 2 entsprechen dem Ablauf einer klassischen AKR. Diese liefern, wie schon mehrmals erwähnt, nahezu gleiche Lösegeschwindigkeiten und werden folgend zusammen betrachtet. In der ersten Phase wird sehr viel Potential durch die hohe Lösegeschwindigkeit von über 21 mg/l/d gesetzt. Diese Lösegeschwindigkeit und somit ausreichend Potential bietet sich auch noch in der Phase 2, wo eine Lösegeschwindigkeit von 14 mg/l/d bestimmt wird. In der letzten Phase ist die Lösegeschwindigkeit noch hoch genug, um ausreichend Potential für weitere Schädigungen zur Verfügung zu stellen. Schaut man sich vergleichend die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs an, zeigt sich genau das beschriebene Szenarium. Durch das anfangs hohe Potential sind sehr schnell makroskopische Veränderungen an den Probekörpern in Form von Dehnungen bzw. Rissbreiten zu messen. Bei der fortschreitenden Lagerung der Balken der Gesteinskörnung 1 erreichen die Dehnungen schon nach circa 140 Tagen ihren Endwert und steigen nur noch unwesentlich an. Genügend Potential für ein Fortschreiten der Dehnungen wäre durch die ausreichende Lösegeschwindigkeit noch gegeben, doch Auslaugungen der Balken verhindern einen weiteren Dehnungsanstieg [31, 22]. Zudem bieten entstandene Risse am Balken genügend Platz für weitere Gele.

Der Würfel mit der Gesteinskörnung 2 zeigt hohe Rissbreiten. Auch hier sind durch die hohen Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 ausreichend Potential für das schnell und stark einsetzende Schadensbild vorhanden. Durch geringere Auslaugungsprobleme beim großformatigen Würfel in der Nebelkammer nehmen über die gesamte Lagerungsdauer die Rissbreiten zu, denn die Lösegeschwindigkeit ist auch in der Phase 3 genügend hoch und bietet ausreichend Potential.

Auf Auslaugungsprobleme sind möglicherweise auch die ausbleibenden Dehnungsveränderungen bei den Balken mit der Gesteinskörnung 3 zurückzuführen. Zum Zeitpunkt der entstehenden Rissbreitenentwicklung am Würfel führt hingegen am Balken die verringerte Konzentration der Alkalien zu kei-

ner Dehnung mit den dann erst in ausreichender Menge überschüssigen  $\text{SiO}_2$ . Die Lösegeschwindigkeit ist in der ersten Phase zu gering für eine sofort einsetzende Schädigung. Jedoch erhöht sich sukzessiv die Lösegeschwindigkeit bis zur dritten Phase, so dass die Rissbreitenentwicklung am Würfel verzögert einsetzt. Die Schädigung am Würfel der Gesteinskörnung 3 ist ein Beispiel für die spät reagierende AKR.

Bei der Gesteinskörnung 4 ist in der ersten Phase eine geringe Lösegeschwindigkeit zu messen, diese nimmt in den weiteren Phasen ab, so dass nicht genügend Potential in den verschiedenen Phasen zur Verfügung steht, um eine schädigende AKR zu initialisieren. Die Reaktionen der Gesteinskörnung 4 sind dem Ablauf der nicht schädigenden AKR zuzuordnen.

Mit Hilfe der Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 bis 3 ist es möglich das Löseverhalten von Gesteinskörnungen im alkalischen Milieu zu beschreiben und somit die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen an der Lieferkörnung zu bewerten. Darüber hinaus lässt sich die zu erwartende Schädigung infolge einer AKR im Beton zeitlich eingrenzen. Dies erlaubt Gesteinskörnungen anhand von chemischen Kennwerten betonunabhängig zu beurteilen.

## 5.5 Einfluss von physikalischen Eigenschaften

### 5.5.1 Wasseraufnahme der Gesteinskörnung

Neben den chemischen Eigenschaften beeinflussen auch die physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen den Ablauf einer AKR im Beton. Einer der wichtigsten Kennwerte des Betons ist der  $w/z$ -Wert. In der Literaturübersicht ausführlich dargelegt, verändert die Wasseraufnahme nach 24 Stunden ( $WA_{24}$ ) einer Gesteinskörnung teilweise den wirksamen Wassergehalt des  $w/z$ -Wertes. Dies führt u.a. zu einer veränderten Hydroxid- und Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung des Zementsteins [21, 129, 130] bzw. zu variierenden Diffusionskoeffizienten des Betons [131, 132] und somit zu einer anders ablaufenden AKR im Beton. Es ist jedoch anzumerken, dass vornehmlich der  $w/z$ -Wert der umgebenden Zementsteinmatrix in unmittelbarer Nähe der einzelnen Gesteinskörner durch die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung reduziert wird. Dieses in der Gesteinskörnung vorhandene Wasser reagiert später mit unhydratisiertem Zement [71]. Somit ist die Absenkung des  $w/z$ -Wertes infolge der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung vornehmlich als temporärer Zustand nach der Betonherstellung zu berücksichtigen.

Die Gesteinskörnung wird im 40 °C-Betonversuch trocken eingesetzt. Eine Erhöhung des  $w/z$ -Wertes durch anhaftendes Wasser der Gesteinskörnung wird dadurch ausgeschlossen, jedoch bleibt eine Absenkung des  $w/z$ -Wertes durch eine erhöhte Wasseraufnahme unberücksichtigt. Natürliche Gesteinskörnungen mit einer hohen Wasseraufnahme weisen nicht zwangsläufig eine geringere Rohdichte auf. Nach der Alkali-Richtlinie [4] findet durch die Betonzusammensetzung keine Berücksichtigung der Wasseraufnahme statt. Als Folge mindert sich bei Betonen der wirksame  $w/z$ -Wert in Abhängigkeit der Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen [126].

Im Folgenden wird an den Gesteinskörnungen 1 bis 4 die Veränderung des  $w/z$ -Wertes durch den Einfluss der Wasseraufnahme gezeigt. Zuerst wird eine allgemeine Berechnung des verringerten  $w/z$ -Wertes dargelegt und anschließend mit der Gesteinskörnung 1 beispielhaft erklärt. Die Bestimmung der Wasseraufnahme nach 24 Stunden sowie der Rohdichte der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen sind im Kapitel 4.1.2 aufgeführt. Der  $w/z$ -Wert beim 40 °C-Betonversuch ist mit 0,45 festgelegt. Die Berechnung erfolgt für 1 m<sup>3</sup> Beton. Der Zement ent-

spricht dem Portlandzement nach Kapitel 4.1.1. Der Einfluss der feinen Gesteinskörnung bleibt unberücksichtigt.

Berechnung - verringerter w/z-Wert infolge der Wasseraufnahme der groben Gesteinskörnung

gegeben:

Betonvolumen:	1 m <sup>3</sup>
Zementgehalt:	400 kg/m <sup>3</sup> (Reindichte des Zements: 3,13 g/cm <sup>3</sup> )
Wassergehalt:	180 kg/m <sup>3</sup>
w/z-Wert:	0,45
Luftporengehalt:	1,5 Vol.-%
Gesteinskörnungsanteil:	677,2 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (nach Stoffraumrechnung), davon
	Sand: 30 Vol.-%
	Gesteinskörnung Korngruppe 2/8 mm: 40 Vol.-%
	Gesteinskörnung Korngruppe 8/16 mm: 30 Vol.-%
Gesteinskörnungseigenschaften:	Rohdichte, WA <sub>24</sub> (bekannt)

gesucht:

verringertes w/z-Wert infolge der Wasseraufnahme der groben Gesteinskörnung

Berechnung:

$$\text{Masse}_{\text{Gesteinskörnung}} = \text{Volumen}_{\text{Gesteinskörnung}} * \text{Dichte}_{\text{Gesteinskörnung}} * \text{Gesteinskörnungsanteil}$$

$$\text{Masse}_{\text{Wasser der Gesteinskörnung}} = \text{WA}_{24} * \text{Masse}_{\text{Gesteinskörnung}}$$

$$\text{verringertes w/z-Wert} = (\text{Masse}_{\text{Wasser}} - \text{Masse}_{\text{Wasser der Gesteinskörnung}}) / \text{Masse}_{\text{Zement}}$$



Beispielrechnung - Gesteinskörnung 1

gegeben: (Angaben teilweise aus der allgemeinen Berechnung übernommen)

$$\text{Rohdichte:} \quad \rho_{(2/8)} = 2,57 \text{ kg/dm}^3$$

$$\rho_{(8/16)} = 2,58 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Wasseraufnahme:} \quad \text{WA}_{24(2/8)} = 0,96 \text{ M.-%}$$

$$\text{WA}_{24(8/16)} = 0,77 \text{ M.-%}$$

gesucht:

verringertes w/z-Wert infolge der Wasseraufnahme der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnung 1

Berechnung:

$$\text{Masse}_{\text{Gesteinskörnung1}} = \text{Volumen}_{\text{Gesteinskörnung1}} * \text{Dichte}_{\text{Gesteinskörnung1}} * \text{Gesteinskörnungsanteil}$$

$$\text{Masse}_{\text{Gesteinskörnung1}} = 40 / 100 * 2,57 \text{ kg/dm}^3 * 677,2 \text{ dm}^3 + 30 / 100 * 2,58 \text{ kg/dm}^3 * 677,2 \text{ dm}^3$$

$$\text{Masse}_{\text{Gesteinskörnung1}} = 696 \text{ kg} + 524 \text{ kg} = 1220 \text{ kg}$$

$$\text{Masse}_{\text{Wasser der Gesteinskörnung1}} = \text{WA}_{24} * \text{Masse}_{\text{Gesteinskörnung1}}$$

$$\text{Masse}_{\text{Wasser der Gesteinskörnung1}} = 0,96 / 100 * 696 \text{ kg} + 0,77 / 100 * 524 \text{ kg}$$

$$\text{Masse}_{\text{Wasser der Gesteinskörnung1}} = 7 \text{ kg} + 4 \text{ kg} = 11 \text{ kg}$$

$$\text{wirksamer w/z-Wert} = (\text{Masse}_{\text{Wasser}} - \text{Masse}_{\text{Wasser der Gesteinskörnung1}}) / \text{Masse}_{\text{Zement}}$$

$$\text{wirksamer w/z-Wert} = (180 \text{ kg} - 11 \text{ kg}) / 400 \text{ kg}$$

$$\text{verringertes w/z-Wert} = 0,42$$

Der Einsatz der Gesteinskörnung 1 verringert den w/z-Wert auf 0,42.

Die Ergebnisse der verringerten w/z-Werte sowie die Rohdichten und Wasseraufnahmen für die Gesteinskörnungen 1 bis 4 sind in der Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Absenkung des w/z-Wertes in Abhängigkeit der Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen 1 bis 4

GK	Rohdichte 2/8 mm	Rohdichte 8/16 mm	Masse GK	WA <sub>24</sub> 2/8 mm	WA <sub>24</sub> 8/16 mm	Masse Wasser	w/z- Wert
GK 1	2,57 kg/dm <sup>3</sup>	2,58 kg/dm <sup>3</sup>	1220 kg	0,96 M.-%	0,77 M.-%	11 kg	0,42
GK 2	2,67 kg/dm <sup>3</sup>	2,68 kg/dm <sup>3</sup>	1268 kg	0,78 M.-%	0,50 M.-%	8 kg	0,43
GK 3	2,58 kg/dm <sup>3</sup>	2,59 kg/dm <sup>3</sup>	1225 kg	0,81 M.-%	0,77 M.-%	10 kg	0,43
GK 4	2,59 kg/dm <sup>3</sup>	2,63 kg/dm <sup>3</sup>	1236 kg	1,85 M.-%	1,37 M.-%	20 kg	0,40

Die Korngruppen der Gesteinskörnungen 1 bis 4 haben ähnliche Rohdichten, wodurch die Anteile der Gesteinskörnungen im Beton nicht wesentlich voneinander abweichen. Die Wasseraufnahmen der Gesteinskörnungen 1 bis 3 sind ebenfalls relativ gleich. Der wirksame  $w/z$ -Wert ist auf 0,42 bzw. 0,43 abgesenkt. Lediglich die Gesteinskörnung 4 hat durch die erhöhte Wasseraufnahme einen noch geringeren  $w/z$ -Wert von 0,40.

Die Ergebnisse stellen deutlich heraus, dass die Wasseraufnahme einer Gesteinskörnung zu Veränderungen des  $w/z$ -Wertes führen kann. Eine Absenkung des  $w/z$ -Wertes hat zur Folge, dass die Hydroxid- und Alkaliionenkonzentration der Porenlösung des Zementsteins und die Dichtigkeit des Gefüges zunehmen [21]. Eine erhöhte Hydroxid- und Alkaliionenkonzentration der Porenlösung des Zementsteins bedingt eine schnellere Reaktion mit der Gesteinskörnung [129]. Im Gegensatz dazu zeigen Untersuchungen von Dressler und anderen [128] zur Porosität von Zementsteinen, dass durch eine Absenkung des  $w/z$ -Wertes von 0,45 auf 0,40 der Ionentransport um ca. 31 % verringert wird, was zu einer reduzierten AKR führt. Ein veränderter  $w/z$ -Wert im Beton kann sich demnach positiv wie auch negativ auf den Ablauf einer AKR auswirken. Um diesen Einfluss bei der Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen auszuschließen, ist die zementunabhängige Prüfung direkt am Korn durch den Löseversuch dem 40 °C-Betonversuch vorzuziehen.

#### 5.5.2 Berücksichtigung der offenen Porosität der Gesteinskörnung - BTU-SP-Test

Bevor eine Schädigung des Betongefüges durch AKR-Gele stattfindet, werden diese in vorhandenen Hohlräumen schädigungsfrei abgelagert. Ob diese vorhandenen Hohlräume des Betons als Pufferraum anzurechnen sind, wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Bonzel und andere [129] schlussfolgern aus einem erhöhten Luftporengehalt nicht zwangsläufig auf eine verringerte AKR-Schädigung. Ebenso ist aus einer zunehmenden Dichtigkeit des Betongefüges nicht auf eine verstärkte AKR zu schließen [51]. Dem entgegen verfolgen einige Autoren [42, 43] die Meinung, dass der vorhandene Porenraum zwischen dem Zementstein und der Gesteinskörnung zuerst ausgefüllt wird, bevor eine Schädigung des Betons erfolgt. Über die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung bestimmt Bachmann [137] die offene Porosität der Gesteinskörnung, welche der Autor als Pufferraum für gebildete Gele ansieht. Welchen Einfluss Bachmann und andere [135] der offenen Porosität im BTU-SP-Test zuweisen, sollen Untersuchungen an den vier Gesteinskörnungen zeigen. Die Abbildung 29 stellt die Ergebnisse des BTU-SP-Tests dar. Der Ablauf der Methode ist in Kapitel 4.2.5 beschrieben.

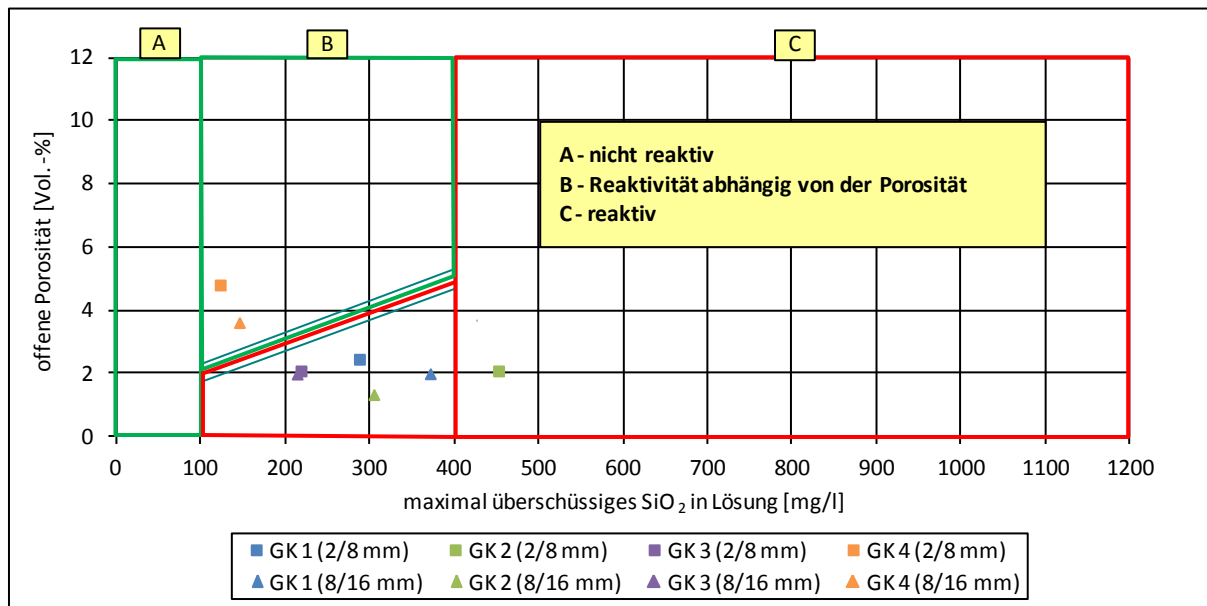


Abbildung 29: BTU-SP-Test - Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Die Ergebnisse des BTU-SP-Tests zeigen verschiedene Alkaliempfindlichkeiten der vier Gesteinskörnungen auf. Demnach sind die Gesteinskörnung 1 und 2 als reaktiv einzustufen. Bei der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 2 liegt die Konzentration des überschüssigen SiO<sub>2</sub> in der Lösung bei 452 mg/l. Somit hat die offene Porosität keinen Einfluss auf die Reaktivität der Gesteinskörnung. Bei der Korngruppe 8/16 mm ist die Porosität zu gering, um die Menge an überschüssigen SiO<sub>2</sub> von 305 mg/l auszugleichen. Bei den Korngruppen der Gesteinskörnung 1 ist der Einfluss der Porosität auf Grund des hohen SiO<sub>2</sub>-Überschusses ebenfalls nicht relevant. Anders ist es bei den Gesteinskörnungen 3 und 4. Durch die offene Porosität von rund 2 Vol.-% werden die Korngruppen der Gesteinskörnung 3 als grenzwertig reaktiv eingestuft. Bei Messwerten nahe der Grenzlinie des Bereiches B wird vermutet, dass diese Gesteinskörnungen im 40 °C-Betonversuch spät reagieren [135]. Der Einfluss der offenen Porosität wird noch deutlicher bei der Betrachtung der Gesteinskörnung 4. Diese ist durch den BTU-SP-Test als nicht reaktiv bewertet. Die sehr hohe offene Porosität von 4,8 Vol.-% bei der Korngruppe 2/8 mm und 3,6 Vol.-% bei der Korngruppe 8/16 mm stellen ausreichend Porenraum für das überschüssige SiO<sub>2</sub> zur Verfügung, so dass die Gesteinskörnung 4 nicht reaktiv ist.

Vergleicht man nun die Ergebnisse des BTU-SP-Tests mit den Lösegeschwindigkeiten der Löseversuche nach 5.4 stellt man fest, dass beide Verfahren die Alkaliempfindlichkeit der vier Gesteinskörnungen gleich beurteilen. Die Ergebnisse des BTU-SP-Tests zeigen, dass durch die Kombination des überschüssigen SiO<sub>2</sub> mit der offenen Porosität eine dem 40 °C-Betonversuch entsprechende Bewertung der Gesteinskörnung erfolgt. Bachmann und anderen [135] gelingt es dadurch, SiO<sub>2</sub>-Überschüsse von weiteren Gesteinskörnungen wie Kiesen an dem 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung abzugleichen. Für die Löseuntersuchungen werden die Gesteinskörnungen gebrochen. Die Menge an verwendeter Gesteinskörnung ist mit 10 g sehr gering und die Methode erfordert für jede Messung einen erneuten Ansatz des Löseversuchs, was eine formalkinetische Auswertung kaum möglich macht. Darüber hinaus wurde der Einfluss des Brechens der Gesteinskörnung nicht hinreichend untersucht, so dass die realen Gesteinskörnungsmerkmale besonders beim Brechen von Lockergesteinen verloren gehen. Die Schaffung von neuen Oberflächen, welche bei Verwendung der Lieferkörnung nicht vorhanden wären, ist auch beim Schnellprüfverfahren kritisch zu betrachten [28]. Lind-

gard und andere [21] fordern die Prüfung der Lieferkörnung und weisen auf Veränderungen der Gesteinskörnungseigenschaften beim Brechen für Laborversuche hin.

Obwohl die Auswertung der Ergebnisse des BTU-SP-Tests bei den vier Gesteinskörnungen zu einer ähnlichen Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen wie die Löseversuche nach Kapitel 5.4 kommen, sollte dennoch der Löseversuch zur Ermittlung der Lösegeschwindigkeiten angewendet werden, weil dadurch die Verwendung der Gesteinskörnung in den originalen Korngruppen möglich ist, welche auch im 40 °C-Betonversuch eingesetzt werden. Somit sind besser vergleichbare und vor allem reproduzierbarere Ergebnisse im Vergleich zu Verfahren mit dafür gebrochenem Material zu erzielen. Darüber hinaus ist es möglich, formalkinetische Betrachtungen der ermittelten Konzentrationen durchzuführen. Besonders durch den Zeitraum von 56 Tagen können langfristige Einflüsse der Gesteinskörnungen erfasst werden. Die Annahme von Bachmann [137], dass nach 14 Tagen die maximale Konzentration an überschüssigen  $\text{SiO}_2$  in der Lösung erreicht ist, wird durch die Löseversuche zur Bestimmung der Lösegeschwindigkeiten widerlegt. Die Lösegeschwindigkeiten beschreiben die Reaktivität der Gesteinskörnung betonunabhängig und erlauben eine Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen, welche über die Eingruppierung in reaktiv und unempfindlich hinaus geht. Für die Ermittlung der Lösegeschwindigkeiten ist keine Einbeziehung der offenen Porosität notwendig. Primär sind es die chemischen Kennwerte  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  der Gesteinskörnung, welche die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung bestimmen. Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung beeinflusst den Ablauf einer AKR. Jedoch ist die Wasseraufnahme nicht nur ein Maß der Porosität sondern auch ein Maß für die vorhandenen Oberflächen einer Gesteinskörnung, so dass abhängig von der Wasseraufnahme andere Oberflächen als Reaktionsorte für das alkalische Medium betrachtet werden müssen. Diese unterschiedlichen Oberflächen werden durch die Verwendung der originalen Lieferkörnung mit berücksichtigt.

### 5.5.3 Bestimmung der Oberfläche von Gesteinskörnungen

Eine Gesteinskörnung mit einer rauerer Oberfläche und einer besseren Zugänglichkeit bietet der alkalischen Lösung eine größere Reaktionsfläche als eine Gesteinskörnung mit einer eher geschlossenen und glatten Oberfläche. Nach Grattan-Bellew [75] ist es schwierig die Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinskörnungen zu bestimmen. Ansätze die Oberfläche über einfache Berechnungen einer Kugel- oder Würfelform der Körner zu berechnen, spiegeln nicht die Realität wieder. Geht man von einem mittleren Korndurchmesser von 5 mm bei der Korngruppe 2/8 mm aus, würde sich je nach der angenommen Form der Gesteinskörner eine Fläche von 79 mm<sup>2</sup> für eine Kugel bzw. 150 mm<sup>2</sup> für einen Würfel ergeben. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Gesteinskörnungen würden sich lediglich durch eine Korngrößenverteilung ergeben. Dieses Prinzip wird bei der k-Wert-Ermittlung angewendet, um die spezifische Oberfläche einer Gesteinskörnung abzuschätzen und darüber den Wasseranspruch anzugeben. Die k-Werte für die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 sind in der Tabelle 14 zusammengestellt.

Tabelle 14: Gegenüberstellung der k-Werte der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Kennwert	GK 1		GK 2		GK 3		GK 4	
	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm
k-Wert [-]	4,51	6,14	4,77	5,80	4,82	5,86	4,33	5,85
k-Wert (gewichtet) [-]	5,21		5,21		5,27		4,98	

Die Tabelle 14 zeigt unterschiedliche k-Werte für die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4. Nach der Wichtung der Korngruppen entsprechend des 40 °C-Betonversuchs ist festzustellen, dass lediglich die Gesteinskörnung 4 einen geringeren k-Wert von 4,98 im Vergleich zu den anderen Gesteinskörnungen (5,21 - 5,27) aufweist. Die Gesteinskörnung 4 besitzt nach diesem Ergebnis die größte spezifische Oberfläche der vier Gesteinskörnungen. Da es sich bei den Gesteinskörnungen 2 und 3 um gebrochene Körner handelt, ist hier die Oberfläche höher anzunehmen als bei den Rundkörnern der Gesteinskörnung 1, obwohl der gleiche k-Wert erreicht wird. Wie bei der Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen schon festzustellen ist, kann auch durch die gewichteten k-Werte der Gesteinskörnung 4 der höchste Wasseranspruch zugewiesen werden. Jedoch zeigen die gewichteten k-Werte, dass die Abweichungen zu gering sind, um auf ein verlässliches Maß der Oberfläche zu schließen.

Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Ergebnisse der k-Wert-Ermittlung (Tabelle 14) mit den Lösegeschwindigkeiten aus den Löseversuchen der Gesteinskörnungen (Abbildung 28), dass zwischen der Löslichkeit und dem k-Wert keine Korrelation möglich ist. Die Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 1 hat entsprechend dem k-Wert von 4,51 eine größere Oberfläche als die Korngruppe 8/16 mm mit dem k-Wert von 6,14. Die Löslichkeit der Korngruppe 8/16 mm ist jedoch wesentlich höher als bei der Korngruppe 2/8 mm. Bei der Gesteinskörnung 2 trifft der Fall zu, dass die kleinere Korngruppe 2/8 mm mit der größer anzunehmenden Oberfläche die höhere Löslichkeit im Vergleich zur Korngruppe 8/16 mm aufweist. Bei der Gesteinskörnung 3 treten bei unterschiedlichen k-Werten der Korngruppen gleiche Lösegeschwindigkeiten auf. Die Gesteinskörnung 4 zeigt nochmals, dass zwischen dem k-Wert und der Löslichkeit einer Gesteinskörnung im Alkalischen keine Korrelation zu finden ist. Die Lösegeschwindigkeiten der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 4 sind nur geringfügig kleiner als die Lösegeschwindigkeiten der Korngruppe 8/16 mm. Zudem hat die Gesteinskörnung 4 den kleinsten gewichteten k-Wert der vier Gesteinskörnungen, weist dabei aber die geringsten Lösegeschwindigkeiten im Löseversuch auf.

Der Einsatz der  $\mu$ -Röntgen 3D-Computertomografie (3D-CT) der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) erlaubt es, das Mikrogefüge im Beton zu visualisieren [144, 147]. Diese Methode bietet ebenso eine Möglichkeit, das Gefüge der Gesteinskörnung zerstörungsfrei zu untersuchen und somit die Oberfläche der Gesteinskörnung direkt am Korn zu ermitteln. Die 3D-CT-Messung bietet eine gute Möglichkeit Oberflächenbestimmungen der Gesteinskörnungen für Forschungszwecke vorzunehmen. Die Versuchsanordnung hat eine maximale Auflösung von 10  $\mu$ m. Durch die fraktale Oberflächenbestimmung bleiben einige Anteile der Oberfläche unberücksichtigt. Für eine gängige Prüfung der Gesteinskörnung ist diese Methode zu zeit- und kostenintensiv. Mit der Unterstützung der BAM, in Person von Herrn Dr. Weise, ist es gelungen, die Oberflächen einzelner Körner für die Gesteinskörnung 1 zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 15 zusammengestellt.

Tabelle 15: Oberflächen einzelner Körner der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 1 mittels 3D-CT-Messung [BAM, Dr. Weise]

Bezeichnung	Oberfläche außen	Oberfläche innen	Oberfläche gesamt
Korn 1	77 mm <sup>2</sup>	161 mm <sup>2</sup>	238 mm <sup>2</sup>
Korn 2	51 mm <sup>2</sup>	98 mm <sup>2</sup>	149 mm <sup>2</sup>
Korn 3	36 mm <sup>2</sup>	109 mm <sup>2</sup>	145 mm <sup>2</sup>
Korn 4	67 mm <sup>2</sup>	21 mm <sup>2</sup>	88 mm <sup>2</sup>
Korn 5	68 mm <sup>2</sup>	42 mm <sup>2</sup>	110 mm <sup>2</sup>
Mittelwert	60 mm <sup>2</sup>	86 mm <sup>2</sup>	146 mm <sup>2</sup>

Die Oberflächenermittlung mittels 3D-CT-Messung ergibt für die Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 1 Oberflächen zwischen 88 und 238 mm<sup>2</sup>. Der Mittelwert der Messungen beträgt 146 mm<sup>2</sup>. Die Messungen der einzelnen Körner schwanken teilweise erheblich. Dies trifft besonders auf die inneren Oberflächen zu. Hier ergeben die Messungen Werte von 21 bis 161 mm<sup>2</sup>. Dieses Ergebnis zeigt zum Einen, dass durch die 3D-CT-Analyse weit mehr Körner gemessen werden müssen, um ein generelles Maß der Oberfläche der Gesteinskörnung 1 zu erhalten. Zum Anderen wird deutlich, dass bei der Gesteinskörnung 1 die Oberfläche jedes Korn unterschiedlich und somit auch die Reaktionsfläche für die Porenlösung des Zementsteins bei jedem Korn anders ist. Die Abbildung 30 stellt anschaulich die Körner 1 und 4 der Tabelle 15 dar. Die innere Oberfläche der Körner ist rot markiert.

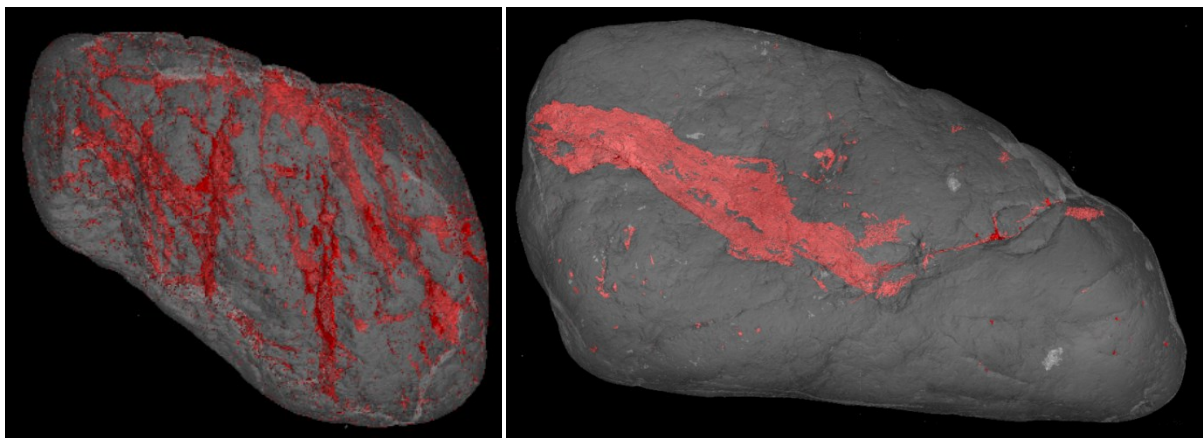


Abbildung 30: Oberfläche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung 1 (links: Korn 1, rechts: Korn 4) [BAM, Dr. Weise]

Der Tabelle 15 ist zu entnehmen, dass beim Korn 1 die innere Oberfläche ca. achtfach so hoch ist wie beim Korn 4. Die bildhafte Darstellung der Körner 1 und 4 der Gesteinskörnung 1 bestätigt diesen Unterschied der inneren Oberflächen. Der Anteil der rot markierten Flächen ist beim Korn 1 (links) augenscheinlich höher als beim Korn 4 (rechts). Besonders beim Korn 4 ist zu erkennen, dass hier ein großer Teil der inneren Oberfläche mit der äußeren Oberfläche verbunden ist und somit diese innere Oberfläche für eine Reaktion mit der alkalischen Lösung zur Verfügung steht.

Die vergleichsweise Darstellung der Ergebnisse der Oberflächenwerte mit verschiedenen Methoden bzw. Berechnungsgrundlagen zeigt wie abhängig die Oberfläche zum Einen von der angenommenen Kornform und zum Anderen von der Schwankung der realen Kornoberfläche ist. Die Ermittlung der Gesteinskörnungsoberfläche über mathematische Annahmen oder die k-Wert-Ermittlung bietet le-

diglich eine grobe Annäherung an die real existierende Oberfläche der Gesteinskörnung und der große Aufwand die Oberfläche mittels 3D-CT-Messung zu bestimmen, bietet nur für Forschungszwecke jedoch nicht für die alltägliche Laboranwendung eine Möglichkeit der Oberflächenermittlung. Auch die Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen kann lediglich eine Abschätzung der benetzbaren Oberfläche der Gesteinskörnung sein. Es bleibt jedoch ungeklärt, welchen Einfluss die Wasseraufnahme auf den Ablauf einer AKR hat. Demnach sollte ein Kennwert der Oberfläche bzw. der Porenräume der Gesteinskörnung bei der Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit mit dem derzeitigen Kenntnisstand unberücksichtigt bleiben. Durch die Verwendung der Gesteinskörnung in der originalen Korngröße im Löseversuch wird der tatsächlich vorhandenen Oberfläche der Gesteinskörnung Rechnung getragen. Porenräume, die als mögliche Ablagerungsräume fungieren, können mit dieser Methode nicht erfasst werden.

#### 5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Es konnte gezeigt werden, dass die physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnung einen Einfluss auf die Schädigung infolge einer AKR haben, diese jedoch mit den angewandten Untersuchungsmethoden teilweise nur sehr aufwändig oder zu ungenau zu bestimmen sind. Des Weiteren wird der Einfluss einiger Parameter in der Literatur kontrovers diskutiert. Schließlich ist festzustellen, dass die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen durch die Lösegeschwindigkeiten der Löseversuche genau beschrieben werden kann. Weitere physikalische Eigenschaften sind für diese Beschreibung der Gesteinskörnungen nicht notwendig, da Parameter wie beispielsweise die Oberfläche der Gesteinskörnung bei dieser Methode berücksichtigt werden.

Mit dem 80 °C-Löseversuch in 0,1 M KOH-Lösung wird durch die Bestimmung der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen das überschüssige  $\text{SiO}_2$  in der Lösung an den Lagerungstagen 4, 14, 28 und 56 ermittelt. Anhand der Lösegeschwindigkeiten der Phasen 1 bis 3 erfolgt über die Zuordnung von Schädigungspotentialen die Beschreibung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen 1 bis 4.

## 6 Anwendung der Methode auf andere Gesteinskörnungen

### 6.1 Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit einem breiten Spektrum der Lösegeschwindigkeiten

Im Folgenden werden die Untersuchungen auf eine größere Anzahl sehr unterschiedlicher Gesteinskörnungen ausgedehnt, um die Methode auch auf andere Gesteinskörnungen anwenden zu können. Somit ist es möglich, Gesteinskörnungen in bekannte Reaktionsmuster einzuordnen, wodurch die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung beurteilt werden kann. Bei den verwendeten Gesteinskörnungen wird bewusst auf petrografische oder mineralogische Beschreibungen verzichtet, um darzulegen, dass allein die ermittelten Lösegeschwindigkeiten ausreichend für eine Beurteilung der Gesteinskörnungen sind. Als Vergleichsverfahren wird stets der auf 360 Tage verlängerte 40 °C-Betonversuch herangezogen, um makroskopisch den aus den Lösegeschwindigkeiten abgeleiteten Einfluss der untersuchten Gesteinskörnung zu belegen.

An fünf verschiedenen Gesteinskörnungen (GK A bis GK E) wird der 80 °C-Löseversuch in 0,1 M KOH-Lösung durchgeführt. Die ermittelten Lösegeschwindigkeiten nach 4, 14, 28 und 56 Tagen sind in der Abbildung 31 aufgeführt. Es sind jeweils die gewichteten Lösegeschwindigkeiten aus den Untersuchungen der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen abgetragen, um eine Korrelation zum 40 °C-Betonversuch zu erhalten. Die Einzelwerte der Lösegeschwindigkeiten der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Gesteinskörnungen sind dem Anhang (Tabelle A-15 bis Tabelle A-18) zu entnehmen.

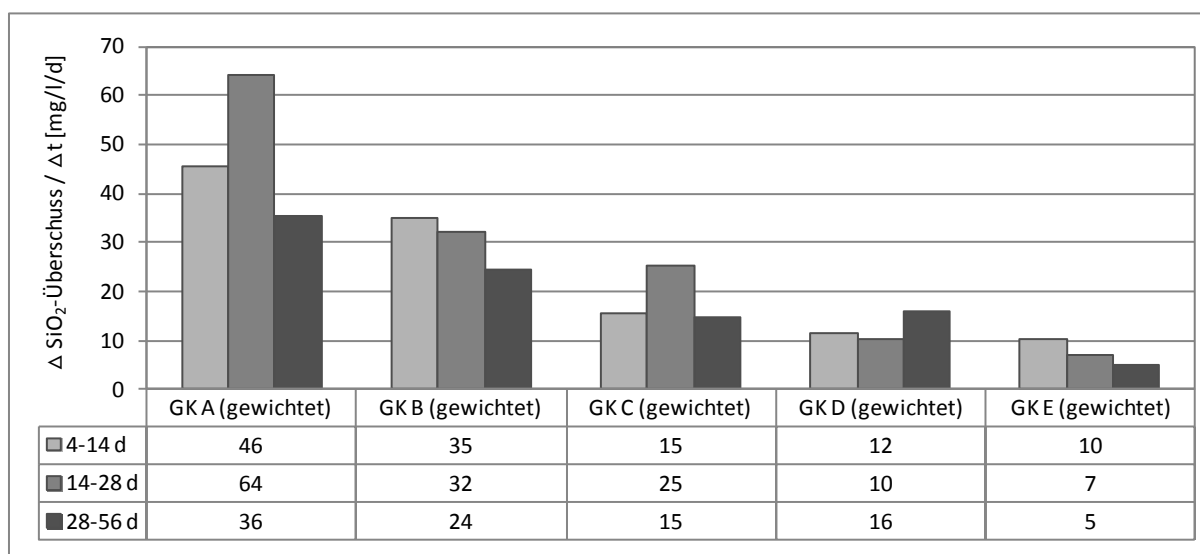


Abbildung 31: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen A bis E in den Phasen 1 bis 3

Die Gesteinskörnungen A bis E zeigen deutlich unterschiedliche Lösegeschwindigkeiten. Bei der Gesteinskörnung A ist in der Phase 1 eine Lösegeschwindigkeit von 46 mg/l/d zu messen. In der nächsten Phase steigt die Lösegeschwindigkeit auf 64 mg/l/d an und in der Phase 3 sinkt die Lösegeschwindigkeit auf 36 mg/l/d. Die Gesteinskörnung A weist in allen drei Phasen eine sehr hohe Lösegeschwindigkeit auf, wodurch eine hohe Schädigung bei der Verwendung dieser Gesteinskörnung im Beton zu erwarten ist. Die Lösegeschwindigkeiten bei der Gesteinskörnung B sind insgesamt geringer als bei der Gesteinskörnung A. Trotzdem ist die Lösegeschwindigkeit schon in der Phase 1 mit 35 mg/l/d relativ hoch und in der Phase 2 sinkt die Lösegeschwindigkeit nicht signifikant. Auch die letzte Phase bietet mit 24 mg/l/d genügend überschüssiges SiO<sub>2</sub>, um weitere Schäden zu verursa-



chen. Bei der Gesteinskörnung C ist in der ersten Phase die Lösegeschwindigkeit mit 15 mg/l/d moderat. In der folgenden Phase 2 steigt die Lösegeschwindigkeit auf 25 mg/l/d an. Aus der deutlich erhöhten Lösegeschwindigkeit in dieser Phase ist eine zeitlich versetzte Schädigung zu erwarten. In der Phase 3 ist die Lösegeschwindigkeit mit 15 mg/l/d wiederum moderat, was zu weiteren Schädigungen führen kann. Bei der Gesteinskörnung D ist eine Schädigung später als bei der Gesteinskörnung C abzusehen. Darauf verweisen die geringen Lösegeschwindigkeiten in den beiden Anfangsphasen und die ansteigende Lösegeschwindigkeit von 16 mg/l/d in der Phase 3. Bei der fünften Gesteinskörnung wird auf Grund der geringen Lösegeschwindigkeiten, welche zudem in der Phasenabfolge weniger werden, keine Schädigung auftreten.

Der Vergleich aller Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen A bis E in der Abbildung 31 offenbart eine generelle Abnahme der Absolutwerte der Lösegeschwindigkeiten von links nach rechts. Somit ist bei der Gesteinskörnung A von dem höchsten Schädigungspotential im 40 °C-Betonversuch und bei den rechts davon abgebildeten Gesteinskörnungen mit einer Abnahme der Schädigung im Beton entsprechend der verringerten Lösegeschwindigkeiten auszugehen. Diese Tendenz setzt sich fort bis zur Gesteinskörnung E, wo keine Schädigung vermutet wird. Das zeitliche Eintreten einer eventuellen Schädigung im Beton, wie oben beschrieben, ist durch die Abstufungen der Lösegeschwindigkeiten der jeweiligen Gesteinskörnung bestimmt. Die Dehnungen der Betonbalken mit den Gesteinskörnungen A bis E sind in der Abbildung 32 vergleichend mit den Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen dargestellt. Die Rissbreiten an den Würfeln sind bei diesen fünf Gesteinskörnungen geringer als die Dehnungen der Balken zu bewerten, weil das Kriterium der Dehnung maßgebend ist.

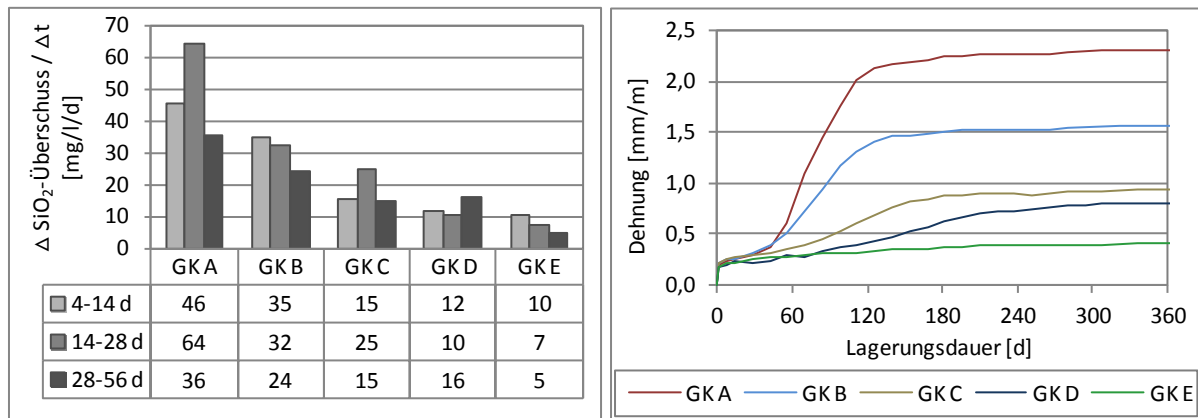


Abbildung 32: Gegenüberstellung der Lösegeschwindigkeiten (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) und der Dehnungen (40 °C-Betonversuch) der Gesteinskörnungen A bis E

Die Dehnungen der Balken mit den Gesteinskörnungen A bis E decken im 40 °C-Betonversuch eine sehr große Spanne an möglichen Endwerten als auch an Verläufen ab. Es ist erkennbar, dass die Dehnung beim Beton mit der Gesteinskörnung A mit 2,31 mm/m am größten ist und diese somit als sehr reaktiv einzustufen ist. Die Gesteinskörnung B verursacht eine Enddehnung von 1,56 mm/m und ist somit etwas weniger aber immer noch deutlich reaktiv. Die Dehnungskurven bei Verwendung der Gesteinskörnungen A und B steigen zwischen 28 und 140 Tagen sehr stark an und nehmen nach 140 Tagen nur noch wenig zu. Bei den Gesteinskörnungen C und D treten Dehnungen deutlich später auf. Diese erreichen nach 360 Lagerungstagen lediglich moderate Dehnungen von 0,94 mm/m bei der Gesteinskörnung C und 0,8 mm/m bei der Gesteinskörnung D. Die Dehnungen der Betonbalken mit

der Gesteinskörnung E mit einem Endwert von 0,41 mm/m resultieren fast ausschließlich aus der Temperatur- und Feuchtezunahme der Betonbalken.

Diese Dehnungsverläufe entsprechen exakt der vorangegangenen Beschreibung der Lösegeschwindigkeiten. Durch sehr hohe Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 dehnen die entsprechenden Balken der Gesteinskörnungen A und B gleich zum Anfang der Lagerungszeit. Die Lösegeschwindigkeit der dritten Phase trägt dann zu keinen weiteren Dehnungen mehr bei, da zu diesem Zeitpunkt die entstandenen Risse für die Gele genügend Ablagerungsraum bieten und teilweise die Gele schädigungsfrei über die oberflächennahen Risse ausfließen [47]. Bei den Gesteinskörnungen C und D sind die Lösegeschwindigkeiten erst später so hoch, dass diese zu signifikanten Dehnungen führen. Auch das zeitlich versetzte Auftreten der Dehnungen und der langsamere Anstieg der Dehnungskurve bei der Gesteinskörnung D sind mit der zunehmenden Lösegeschwindigkeit in der Phase 3 anstelle der Phase 2 wie bei der Gesteinskörnung C zu erklären. Damit wird nochmals belegt, dass eine anfangs geringe und dann abnehmende Lösegeschwindigkeit, wie bei der Gesteinskörnung E, zu keiner schädigenden AKR führt. Die Abbildung 32 stellt deutlich heraus, dass aus den gewichteten Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnungen der Verlauf und die Höhe der Balkendehnungen des 40 °C-Betonversuchs abgeleitet werden können. Andere Beispiele wie die Gesteinskörnung 2 und 3 im Kapitel 5.4 belegen, dass sich die Lösegeschwindigkeiten bei ausbleibenden Dehnungen in der Rissentwicklung widerspiegeln. Warum einige Gesteinskörnungen im 40 °C-Betonversuch Risse anstatt Dehnungen verursachen, ist bisher ungeklärt. Teilweise wird dieses Phänomen auf Auslaugungsprobleme bei den Balken oder aber auf das Verhältnis zwischen Probekörperabmessung und Korngröße zurückgeführt [51, 7]. Das Zusammenspiel von verschiedenen Reaktionen im Beton (Hydratation, AKR), welche mitunter gleichzeitig ablaufen und sich gegenseitig beeinflussen, sowie die unterschiedlichen Einflüsse auf die Betonprobekörper (Temperatur, Feuchtigkeit, Korngröße) machen eine Vorhersage der exakten Dehnung bzw. Rissbreite schwer möglich. Die Bewertung der Lösegeschwindigkeiten erlaubt eine betonunabhängige Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen. Die Einflüsse des Betongefüges bleiben dabei unberücksichtigt, denn diese variieren bei jeder Rezeptur und sind somit gesondert zu bewerten.

Die fünf Gesteinskörnungen A bis E sowie die zuvor untersuchten Gesteinskörnungen 1 bis 4 zeigen eine große Variation der Lösegeschwindigkeiten hinsichtlich der Abstufung in den einzelnen Phasen als auch in den erreichten Maximalwerten. Um detaillierter die Grenzbereiche der Bewertung der Gesteinskörnungen durch die Lösegeschwindigkeiten aufzuzeigen, werden im Folgenden Gesteinskörnungen auf Grund ihrer Besonderheiten der Lösegeschwindigkeiten vorgestellt.

## 6.2 Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit sehr geringen Lösegeschwindigkeiten

Eine AKR im Beton kann nur auftreten, wenn ausreichend Alkalien in der Porenlösung des Zementsteins vorhanden sind, die Gesteinskörnung reaktiv ist und genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht. Wird einer der drei Faktoren ausgeschlossen, ist mit keiner Schädigung zu rechnen [72]. Wenn demnach die Gesteinskörnung geringe Lösegeschwindigkeiten aufweist, sollte es zu keiner schädigenden AKR kommen. Die Abbildung 33 zeigt links die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  beim Löseversuch und rechts ein Balkendiagramm mit den resultierenden Lösegeschwindigkeiten der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der zwei Gesteinskörnungen F und G. Die Betone mit den Gesteinskörnungen F und G zeigen im 40 °C-Betonversuch keine Anzeichen einer Schädigung. Auch nach einer Lagerungsdauer von über einem Jahr sind weder Dehnungen (außer infolge Temperatur und Feuchte) noch Risse an den Probekörpern zu ermitteln.

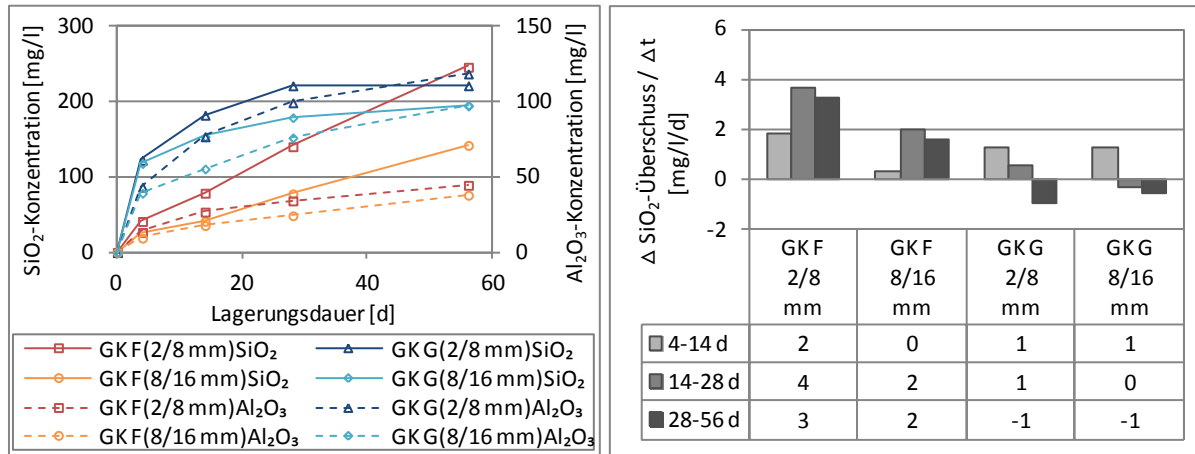


Abbildung 33: Gegenüberstellung der  $\text{SiO}_2$ -/  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen und der Lösegeschwindigkeiten ( $80^\circ\text{C}$ /  $0,1\text{ M KOH}$ -Lösung) der Gesteinskörnungen F und G

Die beiden Korngruppen der Gesteinskörnungen G und F haben mit  $< 5\text{ mg/l/d}$  geringe Lösegeschwindigkeiten. Bei der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnung F löst sich eine größere  $\text{SiO}_2$ -Menge als bei der Korngruppe 8/16 mm. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in den Lösungen sind nahezu gleich. Die Unterschiede spiegeln sich auch in den Lösegeschwindigkeiten wider. In allen drei Phasen liegen die Lösegeschwindigkeiten bei der Korngruppe 2/8 mm unter  $4\text{ mg/l/d}$  und bei der Korngruppe 8/16 mm sogar unter oder gleich  $2\text{ mg/l/d}$ . Die geringen Lösegeschwindigkeiten gründen in den wenig gelösten  $\text{SiO}_2$ -Mengen. Bei der Gesteinskörnung G hat die Lösung mit der Korngruppe 2/8 mm nur geringfügig höhere  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen als die Lösung mit der Korngruppe 8/16 mm. Die Lösegeschwindigkeiten sinken von  $1\text{ mg/l/d}$  auf eine negative Lösegeschwindigkeit von  $-1\text{ mg/l/d}$ . In der Phase 3 verursachen die nahezu gleichbleibende  $\text{SiO}_2$ -Konzentration und die weiterhin ansteigende  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration einen negativen Wert der Lösegeschwindigkeit, d.h. das gelöste Aluminium verhindert vollständig die weitere Auflösung von Silizium und das bereits in der Lösung befindliche Silizium wird aluminosilikatisch gebunden. Da die gesamte Menge an gelöstem  $\text{SiO}_2$  aluminosilikatisch gebunden ist, verbleibt eine überschüssige Menge an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in der Lösung. Eine verlängerte Lagerung der Gesteinskörnung G führt zum Stillstand der Auflösungsreaktion. Es wird weder Silizium noch Aluminium weiter gelöst.

Die Gesteinskörnungen F und G zeigen, dass es unterschiedliche Möglichkeiten gibt, warum die Lösegeschwindigkeiten gering sind. Einerseits werden kontinuierlich geringe Mengen an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei der Gesteinskörnung F gelöst und andererseits wird die vorhandene  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung durch die relativ hohe Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aluminosilikatisch gebunden und eine weitere Auflösung des Siliziums behindert. Eine Schädigung des Betons infolge einer AKR ist bei Gesteinskörnungen mit solch geringen Lösegeschwindigkeiten ausgeschlossen.

### 6.3 Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit hohen Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 sowie einer stark reduzierten Lösegeschwindigkeit in der Phase 3

Nach Wieker und anderen [47] kommt es zu keiner Bildung von Alkalisilikathydraten, wenn nicht genügend  $\text{SiO}_2$  zur Verfügung steht. Der Fall, dass von Anfang an nur sehr wenig  $\text{SiO}_2$  zur Verfügung steht und somit keine AKR-Schäden zu erwarten sind, konnte im Kapitel 6.2 dargelegt werden. Welche Aussagen können für die zu erwartende Schädigung im  $40^\circ\text{C}$ -Betonversuch getroffen werden, wenn die Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 relativ hoch sind und die Lösegeschwindig-

keit in der Phase 3 stark reduziert ist? Um diese Frage zu klären, wird ein Kies untersucht, welcher in den Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm nicht nur als Rundkorn (GK Hr) sondern auch als gebrochenes Material (GK Hg) verfügbar ist. Dadurch ist neben einer geringeren Lösegeschwindigkeit in der Phase 3 zusätzlich der Einfluss des Brechens bei Kiesen zu beschreiben. In der Abbildung 34 sind die Lösegeschwindigkeiten der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm sowie deren Wichtung nach dem 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnungen Hr und Hg dargestellt. Des Weiteren finden sich in der Abbildung 34 die Dehnungen der aus den Gesteinskörnungen Hr und Hg hergestellten Balken des 40 °C-Betonversuchs. Wie schon bei den Gesteinskörnungen A bis E ist auch hier das Dehnungskriterium maßgebend, weil die Rissbreiten der Würfel weniger stark auftreten.

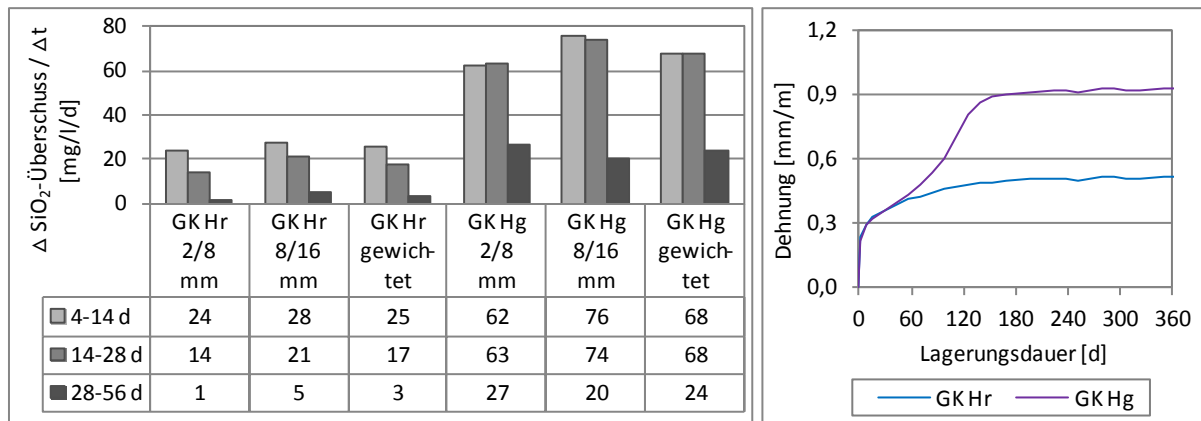


Abbildung 34: Gegenüberstellung der Lösegeschwindigkeiten (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) und der Dehnungen (40 °C-Betonversuch) der Gesteinskörnungen Hr und Hg

In der Abbildung 34 fällt zuerst auf, dass die Lösegeschwindigkeiten des Rundkorns wesentlich vom gebrochenen Material abweichen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm ist nicht festzustellen. Die Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 sind mit über 14 mg/l/d beim runden Material relativ hoch. Dagegen zeigt hier die gebrochene Gesteinskörnung Hg sehr hohe Lösegeschwindigkeiten von über 60 mg/l/d. Bei der Gesteinskörnung Hr nehmen die Lösegeschwindigkeiten von der Phase 1 zur Phase 2 ab und bei der Gesteinskörnung Hg bleiben diese in etwa gleich. In der Phase 3 sinkt bei beiden Gesteinskörnungen die Lösegeschwindigkeit deutlich. Die Gegenüberstellung der gewichteten Lösegeschwindigkeiten mit den Dehnungen zeigt, dass bei der runden Gesteinskörnung Hr die Lösegeschwindigkeiten mit 25 mg/l/d in der Phase 1 und 17 mg/l/d in der Phase 2 relativ hoch sind und auch die Dehnung der Balken im 40 °C-Betonversuch über das Maß infolge der Temperatur- und Feuchtezunahme hinausgeht. Eine stärkere Schädigung des Betons durch die sehr geringe Lösegeschwindigkeit in der Phase 3 von 3 mg/l/d bleibt aus. Demnach zeigen die Ergebnisse der Gesteinskörnung Hr, dass für Langzeitaussagen besonders die Phase 3 entscheidend ist und trotz relativ hoher Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 es zu keiner signifikanten Schädigung im 40 °C-Betonversuch kommt. Hier tritt erstmals der Fall auf, dass Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 und 2 von deutlich über 10 mg/l/d zu keinen signifikanten Dehnungen oder Rissen der Probekörper im 40 °C-Betonversuch führen. Das Kriterium einer sehr geringen Lösegeschwindigkeit in der Phase 3 ist möglicherweise charakteristisch für eine unempfindliche Gesteinskörnung im 40 °C-Betonversuch.

Die Gesteinskörnung Hg verursacht trotz der stark abnehmenden aber immer noch signifikanten Lösegeschwindigkeit in der Phase 3 eine hohe Dehnung der Balken von 0,93 mm/m. Dies liegt an den hohen Lösegeschwindigkeiten in den vorangegangenen Phasen 1 und 2 von über 60 mg/l/d. Dadurch

ist der Einfluss der Phase 3 eher gering. Jedoch ist wie auch bei der Gesteinskörnung Hr erkennbar, dass ab einer Lagerungsdauer von etwa 140 Tagen in der Nebelkammer die Dehnungen der Balken nicht mehr zunehmen. Es ist anzunehmen, dass bei der Gesteinskörnung Hg die stark geminderte Lösegeschwindigkeit in der Phase 3 dazu führt, dass nicht mehr genügend  $\text{SiO}_2$  vorhanden ist, um die entstandenen Gefügestörungen infolge der Dehnung am Balken mit quellfähigen Gel zu füllen. Die Risse der Balken verhindern somit einen weiteren Anstieg der Dehnungen.

Die differenzierte Betrachtung der Lösegeschwindigkeiten zeigt, dass nun auch der Einfluss des Brechens genauer beschrieben werden kann. Durch die größeren Oberflächen beim gebrochenen Material Hg sind deutlich mehr Reaktionsflächen für die Auflösung durch die alkalische Lösung gegeben als beim Rundkorn Hr. Dies spiegelt sich auch in den höheren Dehnungen der Betonbalken mit der Gesteinskörnung Hg im Vergleich zur Gesteinskörnung Hr wider. Die Dehnung der Balken mit der Gesteinskörnung Hr liegt durch die glatte und geschlossene Oberfläche des runden Korns noch unter dem Grenzwert von 0,6 mm/m nach der Alkali-Richtlinie [4]. Der Löseversuch zur Bestimmung der Lösegeschwindigkeiten schließt den Oberflächeneffekt durch die Verwendung der Lieferkörnung mit ein. Die Prüfung durch andere Schnelltests schafft durch das zusätzliche Brechen für die Versuche neue Oberflächen, welche besonders beim Rundkorn Hr nicht vorhanden wären, wie die Lösegeschwindigkeiten und die Dehnungen des 40 °C-Betonversuchs zeigen. Durch das Brechen der Gesteinskörnung auf Prüffractionen ändern sich die Eigenschaften der Gesteinskörnung in der Weise, dass die ursprünglich vorhandenen Merkmale der originalen Korngruppe verändert werden [28, 21].

#### 6.4 Fallbeispiel: Gesteinskörnungen mit einer sehr hohen Lösegeschwindigkeit in der Phase 1

Bei schnell reagierenden Gesteinskörnungen wie Opalsandstein ist ein Pessimumeffekt bei erhöhten Anteilen der reaktiven Opale bekannt. Durch die fortlaufende Erhöhung des Opalsandsteingehaltes einer bestimmten Korngruppe kann der Einsatz bis zur Vermeidung einer AKR führen [39]. Nach Moranville-Regourd [43] sowie Wieker und anderen [47] gibt es ähnlich wie beim Opal auch bei langsamer reagierenden Gesteinskörnungen einen Pessimumeffekt. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass bei hohen  $\text{SiO}_2$ -Mengen nicht genügend Alkalien für die Bildung von Gelen verfügbar sind und demnach mit zunehmend verfügbarer  $\text{SiO}_2$ -Menge die Schädigung infolge einer AKR nicht stetig ansteigt.

Die Gesteinskörnung A in der Abbildung 32 zeigt hohe Lösegeschwindigkeiten von 46 mg/l/d, 64 mg/l/d und 36 mg/l/d in den Phasen 1 bis 3. Entsprechend dieser Lösegeschwindigkeiten führt der Einsatz dieser Gesteinskörnung zu einer deutlichen Schädigung im 40 °C-Betonversuch. Die maximale Dehnung der Balken beträgt 2,31mm/m. Vergleicht man dieses Ergebnis mit der Gesteinskörnung Hg der Abbildung 34, stellt man fest, dass die Lösegeschwindigkeiten mit 68 mg/l/d in den Phasen 1 und 2 sowie 24 mg/l/d in der dritten Phase ähnlich hoch sind wie bei der Gesteinskörnung A. Die Balken der Gesteinskörnung Hg dehnen aber lediglich auf einen Wert von 0,93 mm/m. Ausschlaggebend für die höhere Dehnung bei der Gesteinskörnung A ist unter anderem die um 20 mg/l/d gesteigerte Lösegeschwindigkeit in der Phase 2 zur vorangegangenen Phase. Des Weiteren wird bei sehr hohen Lösegeschwindigkeiten ein Pessimumeffekt vermutet. Dazu wird eine weitere Gesteinskörnung K in die Untersuchungen mit einbezogen, bei welcher die Lösegeschwindigkeit in der Phase 1 noch höher als bei der Gesteinskörnung Hg liegt. In der Abbildung 35 sind die Lösegeschwindigkeiten und die Dehnungen der Gesteinskörnungen A, Hg und K zusammengestellt.

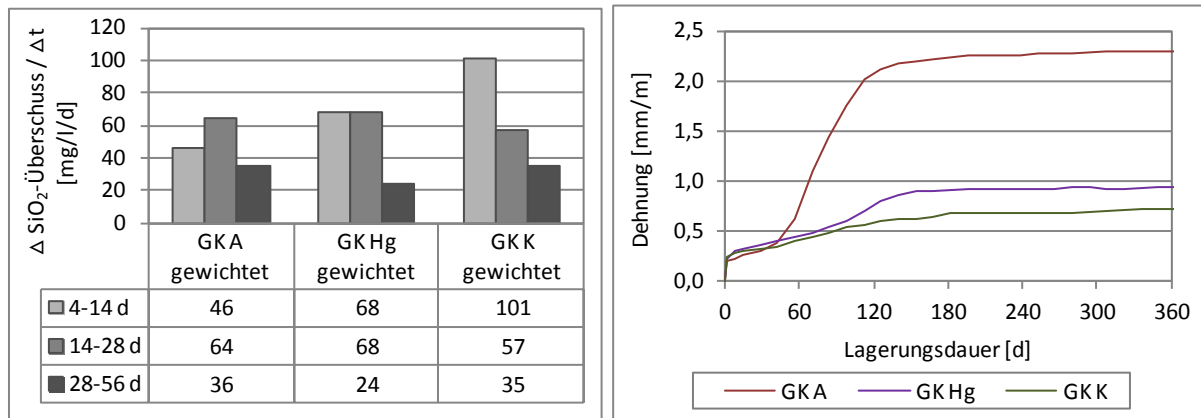


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Lösegeschwindigkeiten (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) und der Dehnungen (40 °C-Betonversuch) der Gesteinskörnungen A, Hg und K

Die Gesteinskörnungen A, Hg und K in der Abbildung 35 zeigen im Löseversuch besonders deutliche Unterschiede der Lösegeschwindigkeiten in der Phase 1. Die Konzentrationen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  sind in den ersten 14 Tagen des Löseversuchs bei diesen Gesteinskörnungen relativ hoch. Dadurch wird bei Verwendung der Gesteinskörnung K eine Lösegeschwindigkeit in der Phase 1 von über 100  $\text{mg}/\text{l}/\text{d}$  erreicht. Je höher die Lösegeschwindigkeit bei den drei Gesteinskörnungen in der ersten Phase ist, desto geringer fallen die Dehnungen der mit den Gesteinskörnungen hergestellten Betonbalken nach 360 Tagen im 40 °C-Betonversuch aus. Dies gilt nur bei diesen sehr hohen Lösegeschwindigkeiten für den Vergleich dieser drei Gesteinskörnungen. Es wird demnach ein Pessimumeffekt der erreichbaren Schädigung des Betons in Abhängigkeit von der Höhe der Lösegeschwindigkeiten postuliert. Nach Wieker und anderen [47] müssen zur Bildung von Gelen nicht nur ausreichende Mengen an reaktiven  $\text{SiO}_2$  vorhanden sein, sondern auch genügend Alkalien zur Verfügung stehen. Durch den Einsatz einer Gesteinskörnung im Beton mit einem so hohen Überschuss an  $\text{SiO}_2$  in der Lösung wie bei den Gesteinskörnungen Hg und K ist von einer Absenkung des pH-Wertes der Porenlösung des Zementsteins auszugehen.

## 6.5 Fallbeispiel: Sonderfall Kiese

Die Löseversuche an den untersuchten Kiesen (Gesteinskörnung 1 und 4) stellen heraus, dass durch die Betrachtung der Lösegeschwindigkeiten die Alkaliempfindlichkeit von Lockergesteinen beschrieben werden kann. In der Tabelle 6 sind die Geröllkomponenten der Gesteinskörnungen 1 und 4 aufgeführt. Anhand der petrografischen Beschreibung wird in Kapitel 5.2.1 versucht, die Alkaliempfindlichkeit der beiden Kiese zu bewerten. Die Annahme der Reaktivität einzelner Bestandteile korreliert jedoch nicht mit den Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs. Im Folgenden soll nun untersucht werden, welche Bestandteile der Gesteinskörnungen 1 und 4 reaktiv sind. Dazu werden Löseversuche an den petrografisch getrennten Geröllkomponenten durchgeführt und dadurch die Lösegeschwindigkeiten der einzelnen Bestandteile der Kiese ermittelt. Geröllkomponenten, welche weniger als 2 M.-% der petrografischen Zusammensetzung der Gesteinskörnung ausmachen, bleiben unberücksichtigt, da hier die Einwaage für einen Löseversuch nach der petrografischen Trennung nicht ausreichend ist. Die Ergebnisse der Löseversuche der Geröllkomponenten der Gesteinskörnung 1 sind in der Abbildung 36 und der Gesteinskörnung 4 in der Abbildung 37 dargestellt. Darüber hinaus sind in den Diagrammen der gewichtete Mittelwert entsprechend der prozentualen Angaben der Geröllanalyse und die Ergebnisse der Korngruppe 8/16 mm der Kiese aufgeführt.

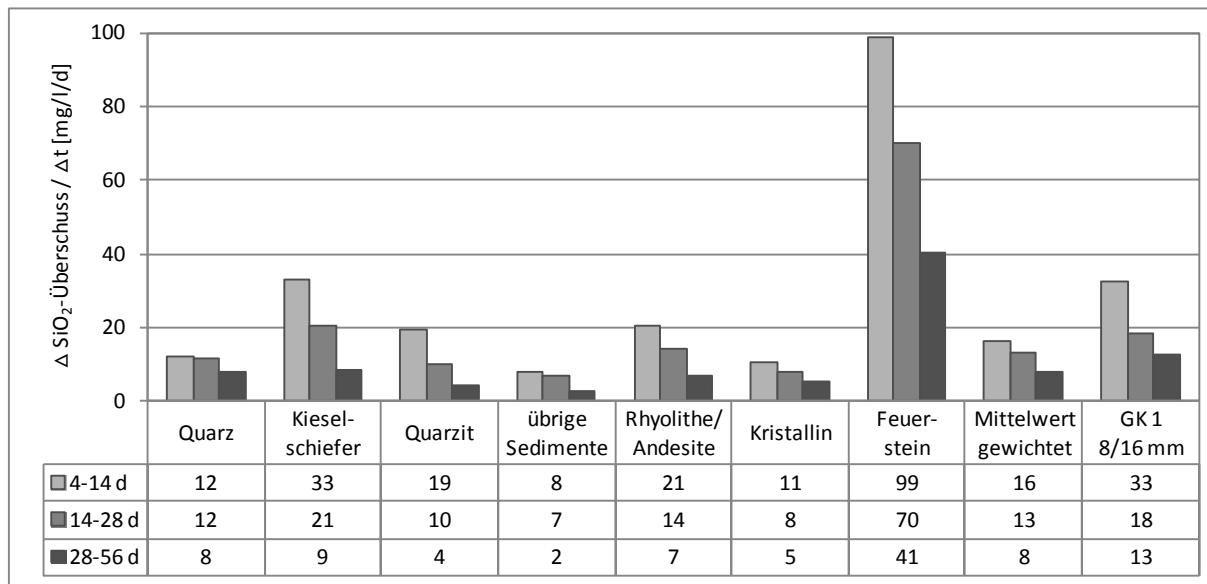


Abbildung 36: Lösegeschwindigkeiten der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 1

Die Löseversuche der Geröllkomponenten der Gesteinskörnung 1 zeigen, dass alle Bestandteile unterschiedliche Lösegeschwindigkeiten aufweisen. Dabei hat Feuerstein vielfach höhere Lösegeschwindigkeiten als die anderen Geröllkomponenten. Dies ist zum Teil 2 der Alkali-Richtlinie, wonach Flinte mit einer Rohdichte größer  $2,45 \text{ g/cm}^3$  alkaliunempfindlich sind, ein scheinbarer Widerspruch, da trotz der Rohdichte von  $2,53 \text{ g/cm}^3$  der Flint beträchtliche  $\text{SiO}_2$ -Mengen in Lösung gibt. Auch Kiesel-schiefer, Quarzit und Rhyolith/ Andesit haben deutlich erhöhte Lösegeschwindigkeiten. Erstaunlich ist, dass der Quarz, welcher in der Literatur oft als AKR-empfindlich benannt wird, im Löseversuch nicht zu erhöhten Lösegeschwindigkeiten führt und sogar die kristallinen Geröllkomponenten ähnliche Ergebnisse erzielen. Die Geröllkomponenten Quarz, kristalline Bestandteile und die übrigen Sedimente bilden zusammen einen Anteil von 80 M.-% der Gesteinskörnung 1. Es ist davon auszugehen, dass die deutlich reaktiven Geröllkomponenten Kiesel-schiefer, Quarzit, Rhyolith, Andesit und Feuerstein, welche 20 M.-% der Gesteinskörnung 1 ausmachen, zu den erhöhten Dehnungen im  $40^\circ\text{C}$ -Betonversuch führen.

Die Abweichung des gewichteten Mittelwerts der Geröllkomponenten von dem Ergebnis der ursprünglichen Korngruppe 8/16 mm macht deutlich, dass die gelösten Anteile der einzelnen Körner sich gegenseitig beeinflussen müssen. Eine Einzelanalyse der Geröllkomponenten ist demnach sinnvoll, um die reaktiven Anteile des Kiesel-schiefers zuordnen zu können. Eine Bewertung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung muss dennoch an der Gesamtlieferkörnung erfolgen.

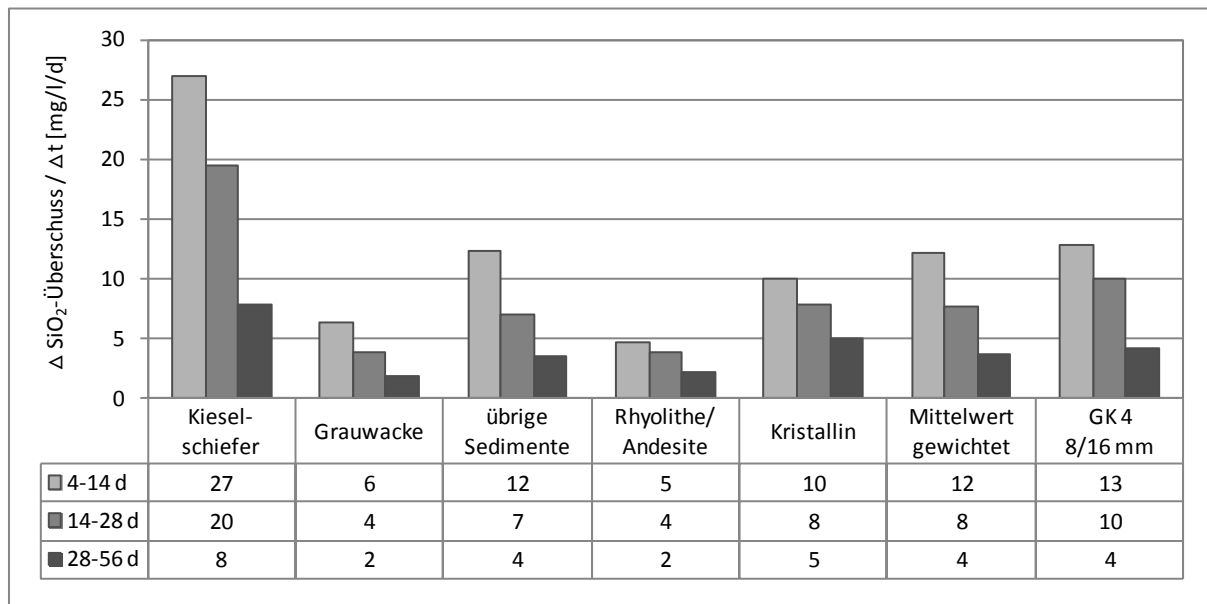


Abbildung 37: Lösegeschwindigkeiten der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 4

Die Analyse der Geröllkomponenten der Gesteinskörnung 4 (Abbildung 37) belegt, dass eine Gesteinskörnung, welche im 40 °C-Betonversuch keine makroskopischen Veränderungen infolge einer AKR zeigt, dennoch reaktive Bestandteile beinhalten kann. Der Anteil des reaktiven Kiesel-schiefers beträgt 12 M.-%. Kiesel-schiefer ist als reaktive Geröllkomponente bekannt und auch der Löseversuch zeigt relativ hohe Lösegeschwindigkeiten von 27 mg/l/d in der Phase 1 und 20 mg/l/d in der Phase 2. Die Bestandteile Grauwacke, Rhyolithe und Kristallin sind entsprechend der Lösegeschwindigkeiten als nicht reaktiv im 40 °C-Betonversuch anzunehmen, da nur geringe Lösegeschwindigkeiten  $\leq 10$  mg/l/d auftreten. Die leicht erhöhte Lösegeschwindigkeit von 12 mg/l/d in der Phase 1 des Löseversuchs der übrigen Sedimente, welche mit 60 M.-% den Hauptteil der Gesteinskörnung 4 ausmachen, nimmt in den Phasen 2 und 3 signifikant ab. Demnach sind die übrigen Sedimente ebenfalls als nicht reaktiv im 40 °C-Betonversuch zu bewerten. Der gewichtete Mittelwert und die Ergebnisse der originalen Lieferkörnung 8/16 mm zeigen ähnliche Lösegeschwindigkeiten. Die Mengen an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus den einzelnen Körnern beeinflussen sich gegenseitig, so dass die Gesteinskörnung 4 im 40 °C-Betonversuch trotz des hohen Anteils an Kiesel-schiefer als unempfindlich bewertet wird.

Über die Geröllanalyse selbst ist keine Zuordnung von reaktiven Bestandteilen eines Kiesel-schiefers möglich, jedoch erlaubt die Analyse der Geröllkomponenten über die Bestimmung der Lösegeschwindigkeiten eine Bewertung der Alkalireaktivität der petrografisch getrennten Bestandteile.



## 7 Einfluss von Zusatzstoffen auf die Auflösung von Gesteinskörnungen in alkalischen Lösungen

Die Reaktivität einer Gesteinskörnung im Beton ist wesentlich von der Hydroxidionenkonzentration der Porenlösung des Zementsteins und der dadurch gelösten Mengen an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus der Gesteinskörnung abhängig. Um eine schädigende AKR zu vermeiden, wird durch die Verwendung von silikatischen Zusatzstoffen wie Microsilica die Hydroxidionenkonzentration der Porenlösung des Zementsteins reduziert [61]. Eine Inhibierung der AKR ist auch durch den Einsatz von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen wie Metakaolin möglich. Hierbei reduziert sich die Alkalität der Porenlösung durch die Einbindung von Alkaliionen in gebildete C-S-H- bzw. C-A-S-H-Phasen [67]. Nach Pardal und anderen [70] nimmt die Aluminiumionenkonzentration in der Lösung mit steigendem Al/Si-Verhältnis der C-A-S-H-Phasen zu. Es ist demnach davon auszugehen, dass beim Einsatz von silizium- oder aluminiumhaltigen Zusatzstoffen im Beton die Porenlösung des Zementsteins eine Menge an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aufweist, welche nicht in C-S-H- bzw. C-A-S-H-Phasen eingebunden ist [67]. Besonders aluminiumhaltige Zusatzstoffe wirken neben der Veränderung der C-S-H-Phasen auch durch Effekte auf der Oberfläche der Gesteinskörnung [69].

Im Weiteren soll durch Löseversuche der löseinhibierende Effekt von Metakaolin als aluminiumhaltiger Zusatzstoff auf die Löslichkeit einer reaktiven Gesteinskörnung im alkalischen Milieu untersucht werden. Ausgangspunkt ist die Charakterisierung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung durch die Bestimmung der Lösegeschwindigkeiten. Für die Versuche wird 1,0 M.-% des Zusatzstoffes bezogen auf die Gesteinskörnungsmenge verwendet. Durch die geringe Dosierung soll die Hydroxidionenkonzentration der KOH-Lösung bzw. der Porenlösung des Zementsteins möglichst unverändert und die Auswirkungen auf das Betongefüge beim 40 °C-Betonversuch gering bleiben. Die Betonversuche mit Zusatzstoff erfolgen auf Grund der geänderten Rezeptur in Anlehnung an den 40 °C-Betonversuch. Mit diesen Untersuchungen soll ebenfalls geklärt werden, ob die erarbeitete Methode der Bestimmung von Lösegeschwindigkeiten von Gesteinskörnungen zur Bewertung deren Reaktivität auch auf die Abschätzung der Wirksamkeit von Zusatzstoffen übertragen werden kann.

### 7.1 Einfluss des Siliziums

In einem ersten Schritt soll der Einfluss des Siliziums auf den Löseversuch dargestellt werden, um eine Abgrenzung zu den aluminiumhaltigen Zusatzstoffen zu erreichen. Dazu werden die hoch reaktive Gesteinskörnung A und handelsübliches Microsilica getrennt und in Mischung durch Löseversuche analysiert. Microsilica wird mit 1,0 M.-% bezogen auf die Gesteinskörnung und somit 0,9 g Zusatzstoff sowohl beim separaten als auch beim gemischten Löseversuch eingesetzt. Die ermittelten Lösegeschwindigkeiten sind in der Abbildung 38 abgetragen. Dabei ist auch die Phase 0 mit abgetragen, da sich Zusatzstoffe auf Grund der meist hohen Oberfläche schnell lösen.

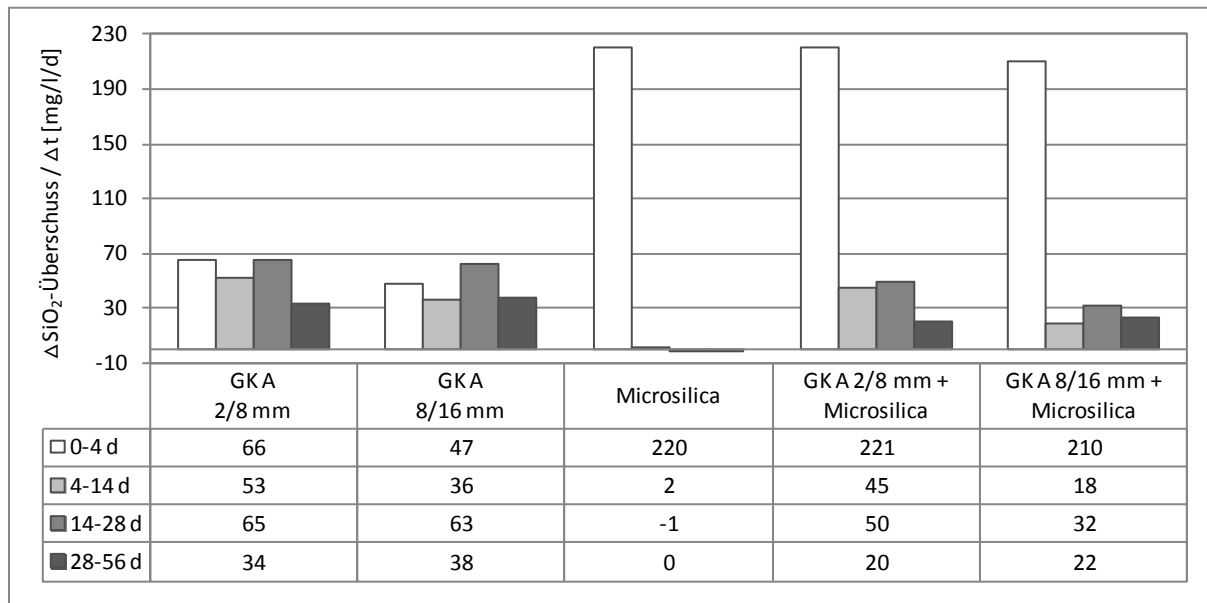


Abbildung 38: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnung A und Microsilica

Betrachtet man zuerst die Ergebnisse der Löseversuche der Korngruppen der Gesteinskörnung A, fällt auf, dass die Lösegeschwindigkeiten der Korngruppe 2/8 mm in den ersten beiden Phasen höher als bei der Korngruppe 8/16 mm sind. Danach werden etwa die gleichen Lösegeschwindigkeiten erreicht. Die Gesteinskörnung A ist auf Grund der hohen Lösegeschwindigkeiten als sehr alkalireaktiv zu bewerten (siehe auch Kapitel 6). Der Löseversuch von Microsilica zeigt, dass in der Phase 0 nahezu die gesamte Auflösungsreaktion von Microsilica stattfindet. Rund 90 % von der Einwaage an Microsilica sind gelöst. Die gemischten Analysen der jeweiligen Korngruppe der Gesteinskörnung A und Microsilica machen deutlich, dass die Phase 0 durch die Auflösung des Microsilica dominiert ist. In der Phase 0 stellen sich in den gemischten Löseversuchen ähnliche Lösegeschwindigkeiten wie im separaten Löseversuch von Microsilica ein. In den anschließenden Phasen der gemischten Löseversuche sind die Lösegeschwindigkeiten reduziert, aber in ähnlichen Abstufungen wie bei den Löseversuchen der Korngruppen ohne Microsilica. Die weiterhin hohen Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 bis 3 lassen auf eine schädigende AKR im 40 °C-Betonversuch schließen. Die Dehnungen sollten jedoch deutlich reduziert sein und später einsetzen. Der ursprüngliche Dehnungsendwert von 2,31 mm/m sollte signifikant unterschritten werden. Die Abbildung 39 zeigt die Dehnungen der Balken der Gesteinskörnung A mit und ohne Microsilica im 40 °C-Betonversuch. Bei der Herstellung der Balken mit Microsilica werden 1,0 M.-% des Zusatzstoffes bezogen auf die grobe Gesteinskörnung dem Zement beigemischt. Der sich ergebende Microsilicaanteil von 12,8 kg/m<sup>3</sup> wird 1:1 auf den Sand angerechnet, um den Zementgehalt von 400 kg/m<sup>3</sup> nicht zu reduzieren. Damit wird ein Verdünnungseffekt der Porenlösung vermieden.

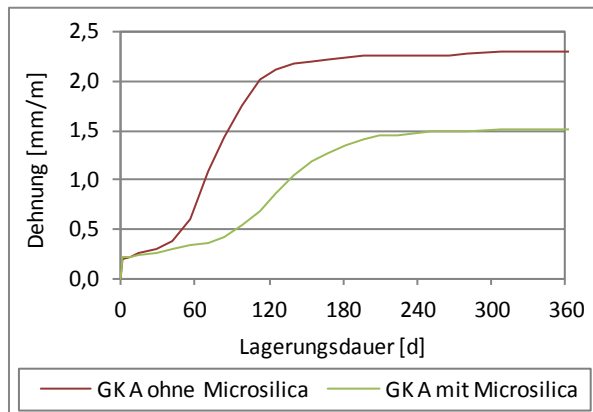


Abbildung 39: Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnung A mit und ohne Microsilica

Die Darstellung der Dehnungen des 40 °C-Betonversuchs in der Abbildung 39 zeigt, dass durch den Einsatz von Microsilica die Enddehnung der Balken von 2,31 mm/m auf 1,51 mm/m abgesenkt wird. Die Dehnungen der Balken mit Microsilica infolge AKR setzen verlangsamt ein. Dieses Ergebnis bestätigt die getroffenen Annahmen aus der Diskussion der Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 bis 3. Durch die Verwendung von Microsilica werden die Lösegeschwindigkeiten reduziert. Jedoch sind diese weiterhin hoch genug, um zu einer Schädigung des Betons zu führen. Die geringeren Dehnungen beruhen nicht nur auf den verminderten Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 bis 3. Der Einsatz von Microsilica im Löseversuch mit der Gesteinskörnung A bedingt eine Lösegeschwindigkeit von über 200 mg/l/d in der Phase 0, so dass im ersten Monat des 40 °C-Betonversuchs eine hohe  $\text{SiO}_2$ -Menge verfügbar ist. Dadurch können mehr Alkalien in die C-S-H-Phasen eingebaut werden, wodurch die Alkalität der Porenlösung des Zementsteins sinkt [58]. Zu einem späteren Zeitpunkt bedingt ein Kationenaustausch zwischen Calcium- und Natriumionen in den silikatischen Hydratphasen eine wieder ansteigende Alkalität der Porenlösung des Zementsteins [63], was die verzögert einsetzenden Dehnungen erklärt.

## 7.2 Einfluss des Aluminiums

Aluminiumhaltige Zusatzstoffe bewirken neben der veränderten Zusammensetzung der C-S-H-Phasen ebenso eine Blockierung der Gesteinskörnungsoberflächen [69]. Im Folgenden wird abweichend zu den vorherigen Versuchen Metakaolin an Stelle von Microsilica verwendet, um die Wirkung von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen zu untersuchen. In der Abbildung 40 sind die Ergebnisse der Löseversuche mit der Gesteinskörnung A und Metakaolin zusammengestellt.

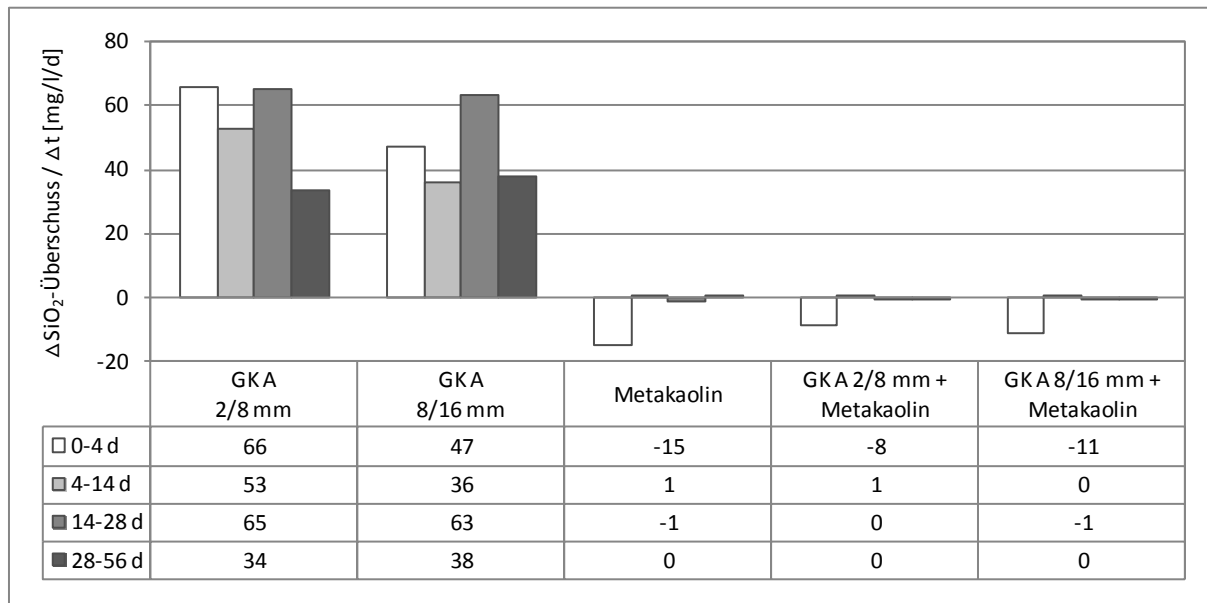
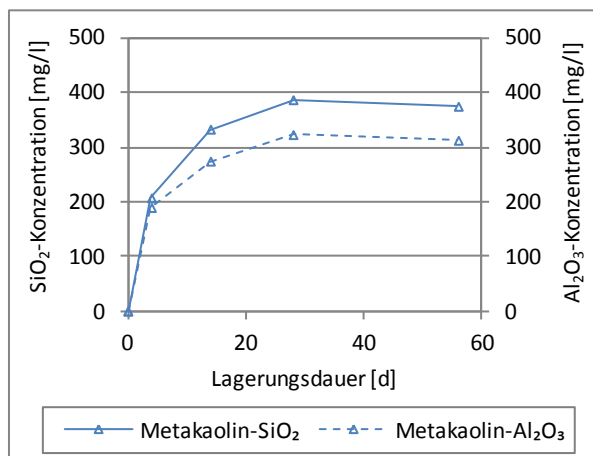


Abbildung 40: Lösegeschwindigkeiten der Gesteinskörnung A und Metakaolin

Die Lösegeschwindigkeiten in der Abbildung 40 zeigen, dass durch den Einsatz von Metakaolin die Löslichkeit der Gesteinskörnung A im Löseversuch vollständig blockiert ist. Bei der Anwesenheit von Metakaolin im Löseversuch verändern sich die Lösegeschwindigkeiten durch die Zugabe der Gesteinskörnung A nur gering. Der Löseversuch mit 0,9 g Metakaolin weist in der Phase 0 eine negative Lösegeschwindigkeit von -15 mg/l/d auf, was bedeutet, dass ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Überschuss in der Lösungsphase vorhanden ist (siehe 5.3.3.1). In den folgenden Phasen 1 bis 3 ist die Lösegeschwindigkeit nahezu Null. Die Abbildung 41 stellt die Konzentrationen von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  des Löseversuchs mit Metakaolin dar, um die ermittelten Lösegeschwindigkeiten zu erklären.

Abbildung 41:  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen - Löseversuch von Metakaolin (0,9 g) in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Bis zu einer Lagerungsdauer von 4 Tagen werden in etwa die gleichen Mengen an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus dem Metakaolin gelöst, somit ergibt sich eine negative Lösegeschwindigkeit durch die überschüssig vorhandene  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration. Bis zum 14. Lagerungstag nimmt die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration stärker zu als die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration. Danach sind die Konzentrationsverläufe nahezu parallel zueinander. Ab dem 28. Lagerungstag stellt sich ein Gleichgewicht in der Lösung ein. Da sich der negative Überschuss der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration nach 4 Tagen nicht signifikant verändert, sind die Lösegeschwindigkeiten ungefähr Null. Durch die Verwendung von 1,0 M.-% Metakaolin sollte demzufolge auch bei den Bal-

ken im 40 °C-Betonversuch keine Dehnung infolge einer schädigenden AKR auftreten. Die Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der Dehnungsmessungen beim 40 °C-Betonversuch.

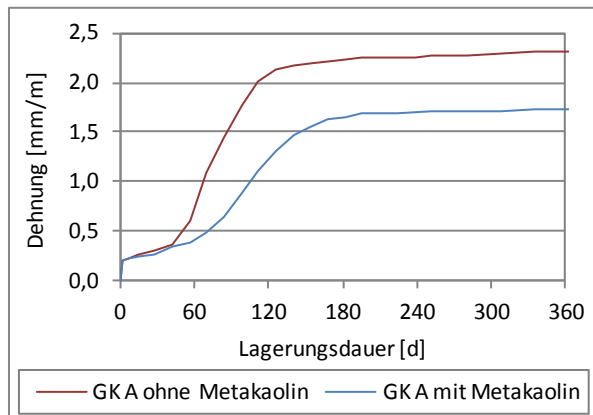


Abbildung 42: Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnung A mit und ohne Microsilica

Zuerst fällt auf, dass die Dehnungen der Balken mit Metakaolin zwar reduziert gegenüber der Balken ohne Metakaolin sind, jedoch eine schädigende AKR nicht vollständig vermieden wird, wie es die Lösegeschwindigkeiten der Löseversuche mit Metakaolin vermuten lassen. Der Grund dafür ist, dass bei den Löseversuchen die geringe Menge an Metakaolin und somit der Konzentration an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ausreicht, um die Oberfläche der Gesteinskörnung zu blockieren, aber beim Einsatz von Metakaolin im Beton die Menge an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus dem Zusatzstoff primär in sich bildende C-A-S-H-Phasen eingebaut wird und somit keine genügende  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Porenlösung des Zementsteins verfügbar ist. In der Abbildung 43 sind die Ergebnisse von Löseversuchen mit geringeren Mengen von Metakaolin mit und ohne der Gesteinskörnung A dargestellt. Die Einwaagen von 0,09 g, 0,27 g und 0,45 g Metakaolin ergeben sich aus den gewählten prozentualen Anteilen von 0,1 M.-%, 0,3 M.-% und 0,5 M.-% Metakaolin bezogen auf 90 g der Gesteinskörnung A.

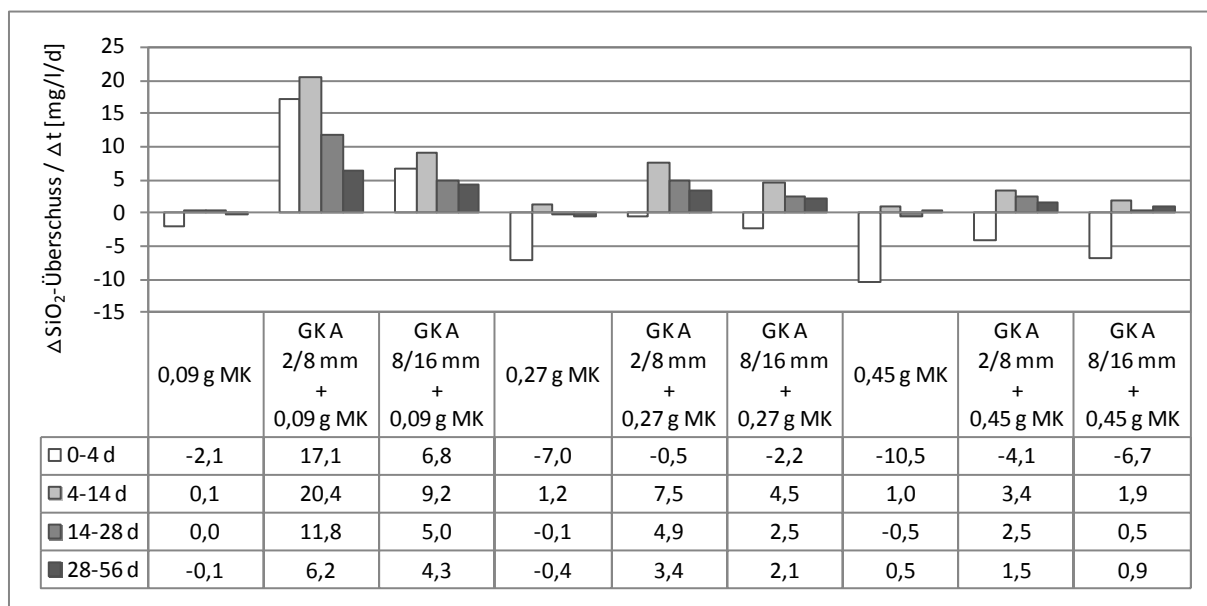


Abbildung 43: Lösegeschwindigkeiten - Löseversuch (80 °C/ 0,1 M KOH-Lösung) von Metakaolin (verschiedene Mengen) in Kombination mit der Gesteinskörnung A

Die Löseversuche mit geringeren Mengen von Metakaolin belegen, dass die Oberfläche der Gesteinskörnung A durch die weniger vorhandene  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration unzureichend blockiert wird. Demzufolge wird  $\text{SiO}_2$  aus der Gesteinskörnung A gelöst und die Lösegeschwindigkeiten nehmen mit geringer werdenden Metakaolinanteilen zu. Folglich kommt es an den Balken beim 40 °C-Betonversuch zu Dehnungen infolge einer schädigenden AKR.

Weitere Forschungen sind notwendig, um die genauen Anteile von Metakaolin zu bestimmen, damit sich eine ausreichende  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der Porenlösung des Zementsteins einstellt, welche die Oberfläche der verwendeten Gesteinskörnung vollständig inhibiert. Darüber hinaus ist zu klären, wie die Menge an gelöstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in der alkalischen Lösung die Oberfläche blockiert. Erste Untersuchungen an polierten Oberflächen der Gesteinskörnung A zeigen die Veränderungen der Oberfläche infolge einer 14 tägigen Lagerung der Gesteinskörnung A in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C mit und ohne Zugabe von Metakaolin.



Abbildung 44: Gesteinskörnung A ohne Metakaolin - links: vor der Lagerung/ rechts: nach 14 d Lagerung in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

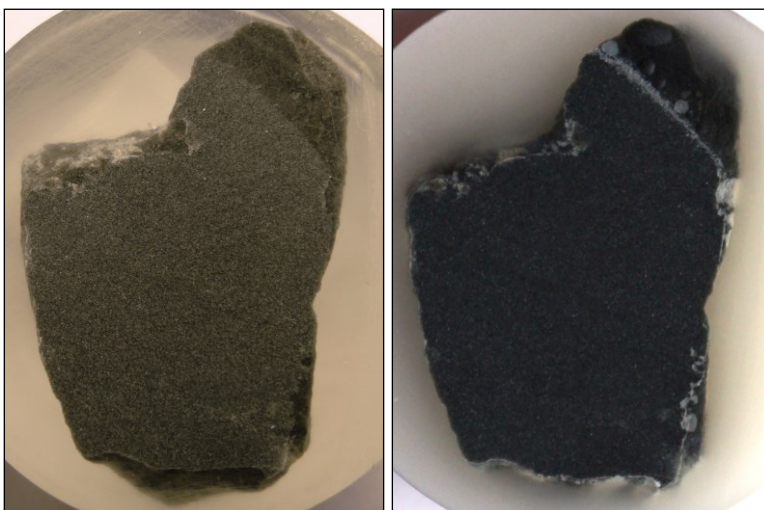


Abbildung 45: Gesteinskörnung A mit Metakaolin - links: vor der Lagerung/ rechts: nach 14 d Lagerung in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

In der Abbildung 44 ist die weiße und aufgeraute Oberfläche der Gesteinskörnung A nach der Lagerung in der KOH-Lösung erkennbar. Durch die Verwendung von Metakaolin ist die Oberfläche der

Gesteinskörnung glatt und schwarz gefärbt (siehe Abbildung 45). Die Zusammensetzung der neu gebildeten Oberflächenschicht zu analysieren, sollte das Ziel nachfolgender Forschungsarbeiten sein.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der Beitrag von Gesteinskörnungen zur AKR im Beton untersucht, mit dem Ziel die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen zu quantifizieren und die zu erwartende Schädigung des Betons durch die Gesteinskörnung detaillierter als bisher klassifizieren zu können. Im Vordergrund der Arbeit stand dabei das Verständnis der Auflösungsprozesse von Gesteinskörnungen in KOH-Lösungen ( $\text{pH} \geq 13$ ) bei unterschiedlichen Reaktionsbedingungen.

Zuerst wurde an vier Gesteinskörnungen (zwei Kiese, eine Grauwacke und ein Rhyolith) der 40 °C-Betonversuch mit einer verlängerten Lagerungsdauer von einem Jahr durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben, dass die Alkaliempfindlichkeiten der Gesteinskörnungen 1 und 2 sehr hoch sind. Bei der Gesteinskörnung 3 traten verstärkt Risse am Würfel zwischen 9 und 12 Monaten auf. Somit ist die Gesteinskörnung 3 spät reagierend. Die Gesteinskörnung 4 ist alkaliunempfindlich. Im Weiteren wurden die vier Gesteinskörnungen mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie [4] untersucht. Die dabei ermittelten Abstufungen der Reaktivität der Gesteinskörnungen stimmen jedoch nicht in allen Fällen mit den Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs überein. Die petrografische Beschreibung der Kiese sowie die mineralogische Begutachtung der vier Gesteinskörnungen ergaben Unterschiede zwischen den Gesteinskörnungen, die jedoch keine Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit, ermittelt aus dem 40 °C-Betonversuch, zuließen.

In einem nächsten Schritt wurden Löseversuche mit den Lieferkörnungen 2/8 mm und 8/16 mm der vier Gesteinskörnungen in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C über eine Lagerungsdauer von 360 Tagen durchgeführt. Dabei wurden die  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der alkalischen Lösungen an ausgewählten Zeitpunkten analysiert. Die Laugenkonzentration, Lagerungstemperatur und -dauer wurden in Anlehnung an die Bedingungen des 40 °C-Betonversuchs festgelegt. Als erstes Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die alleinige Betrachtung der  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen in den alkalischen Lösungen nicht mit den Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs korreliert. Auch die alleinige Betrachtung des gelösten  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus den Gesteinskörnungen ist für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit nicht zielführend. Erst durch die gemeinsame Darstellung der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen der alkalischen Lösungen über die Zeit konnte eine Korrelation mit den Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs gefunden werden. Demnach ist es durch Löseversuche mit den Bedingungen 40 °C und 1,0 M KOH-Lösung möglich, die Reaktivität der Gesteinskörnungen mit chemischen Kennwerten zu beschreiben.

Im weiteren Teil der Arbeit wurden Möglichkeiten aufgezeigt, die Löseversuche zu beschleunigen, ohne dabei die ablaufenden Prozesse wesentlich zu verändern. Zur Erhöhung der Löslichkeit der Gesteinskörnungen wurde das Durchmischen der alkalischen Lösung ebenso wie das zusätzliche Brechen der Gesteinskörnung ausgeschlossen. Beide Varianten führen zu einer Entfernung vom realen Betonsystem. Untersuchungen zum Einfluss eines veränderten Feststoff-Laugen-Verhältnisses von 1:10 auf 1:2 zeigten eine Zunahme der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in der Lösung, wobei die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration ein Maximum durchläuft, was auf die Bildung veränderter Reaktionsprodukte hinweist. Insbesondere eine schnellere Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der untersuchten Gesteinskörnung konnte nicht nachgewiesen werden, so dass das Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:10 beibehalten wurde. Die Erhöhung der Temperatur von 40 °C auf 60 °C und weiter auf 80 °C bei gleichbleibender Laugenkonzentration (1,0 M KOH-Lösung) machte eine Differenzierung der Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit unmöglich. Die  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen in der Lösung veränderten sich infolge der Temperaturerhöhung unterschiedlich. Die Löslichkeit von  $\text{SiO}_2$  konnte beschleunigt werden, jedoch wurde für jede der untersuchten Gesteinskörnungen eine andere Zunahme der  $\text{SiO}_2$ -Konzentration in der Lösung festgestellt. Die absolut



gelösten Mengen von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wurden durch die Temperatursteigerung nicht erhöht. Jedoch setzte der Zeitpunkt, an dem die maximale  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Konzentration in der alkalischen Lösung erreicht wurde, früher ein. Um die erhöhte Lagerungstemperatur von  $80^\circ\text{C}$  zur Beschleunigung auszunutzen und die Eigenschaften der jeweiligen Gesteinskörnung im Löseversuch beizubehalten, wurde die Laugenkonzentration schrittweise gesenkt. Die Untersuchungen zeigten, dass unter den Lagerungsbedingungen  $80^\circ\text{C}$  und  $0,1\text{ M KOH}$ -Lösung innerhalb von 56 Tagen vergleichbare Ergebnisse wie mit den Löseversuchen bei  $40^\circ\text{C}$  und  $1,0\text{ M KOH}$ -Lösung erzielt wurden.

Weiter wurde der Einfluss des aus der Gesteinskörnung herausgelösten Aluminiums vertiefend diskutiert. Durch alumosilikatische Komplexbildungen wird ein bestimmter Teil des gelösten  $\text{SiO}_2$  durch ebenfalls in der alkalischen Lösung vorhandenes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gebunden. Der verbleibende Anteil an  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiO}_{2\text{üb}}$ ) wird nach Hill [94] durch  $\text{SiO}_{2\text{üb}} = \text{SiO}_{2\text{ges}} - 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}}$  ermittelt und steht für eine AKR zur Verfügung. Aus der zeitabhängigen Darstellung dieser  $\text{SiO}_2$ -Konzentration wurde die Lösegeschwindigkeit ermittelt. Dabei wurden vier aufeinanderfolgende Phasen dem Dehnungs- und Rissbreitenverlauf der Probekörper des  $40^\circ\text{C}$ -Betonversuchs zugeordnet (siehe Tabelle 16). Zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung sind die Lösegeschwindigkeiten der letzten drei Phasen entscheidend.

Tabelle 16: Gegenüberstellung der 4 Phasen -  $80^\circ\text{C}$ -Löseversuch in  $0,1\text{ M KOH}$ -Lösung und  $40^\circ\text{C}$ -Betonversuch

Phase	$80^\circ\text{C}$ -Löseversuch in $0,1\text{ M KOH}$ -Lösung	$40^\circ\text{C}$ -Betonversuch	überwiegend stattfindende Prozesse im $40^\circ\text{C}$ -Betonversuch
0	0 - 4 Tage	0 - 1 Monat	Bildung von C-S-H-Phasen
1	4 - 14 Tage	1 - 3 Monate	AKR
2	14 - 28 Tage	4 - 6 Monate	
3	28 - 56 Tage	7 - 12 Monate	

Für die verschiedenen Phasen wurden Lösegeschwindigkeiten des überschüssigen  $\text{SiO}_2$  mittels Löseversuchen bei  $80^\circ\text{C}$  und  $0,1\text{ M KOH}$ -Lösung nach der Gleichung (9) bestimmt.

$$v_{\Delta\text{SiO}_2\text{-Überschuss}/\Delta t} = \frac{\Delta\text{SiO}_2 - 1,4 \cdot \Delta\text{Al}_2\text{O}_3}{\Delta t} \quad (9)$$

In der Phase 0 wird überschüssiges  $\text{SiO}_2$  in C-S-H-Phasen eingebaut und ist somit nicht schädigend gebunden. Anhand der Lösegeschwindigkeiten in den Phasen 1 bis 3 wurde die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen an der Lieferkörnung bewertet. Dabei ist die Höhe der Lösegeschwindigkeit in der jeweiligen Phase ein Maß für die Schädigung der Probekörper im  $40^\circ\text{C}$ -Betonversuch im entsprechenden Zeitraum. Somit war es möglich, eine zeitliche Zuordnung der Schädigung infolge einer AKR im  $40^\circ\text{C}$ -Betonversuch vorzunehmen.

Als nächster Schritt erfolgten Untersuchungen zum Einfluss von physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen auf die AKR. Es wurden die Wasseraufnahme, die offene Porosität und die Oberfläche der Gesteinskörnungen bestimmt. Es zeigte sich, dass diese Kennwerte mit den angewendeten Untersuchungsmethoden teilweise nur sehr aufwändig oder zu ungenau zu ermitteln waren. Durch die Verwendung der Gesteinskörnung in der originalen Korngröße im Löseversuch wird die Oberfläche der Gesteinskörnung berücksichtigt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die physikalischen Eigenschaften lediglich als sekundäre Merkmale der Gesteinskörnungen für den Ablauf einer AKR zu berücksichtigen sind und sich integral im Löseverhalten widerspiegeln.

In einem folgenden Abschnitt der Arbeit wurden die Lösegeschwindigkeiten von Löseversuchen weiterer Gesteinskörnungen bestimmt und mit den jeweiligen Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs verglichen. Dadurch wurde gezeigt, dass die Lösegeschwindigkeiten ein exaktes Abbild der makroskopischen Veränderungen im 40 °C-Betonversuch darstellen. Durch die Erweiterung der Datenbasis war es möglich, den Bereich der Lösegeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Alkaliempfindlichkeiten der Gesteinskörnungen aufzuzeigen. Besonders hervorzuheben sind die Untersuchungen der einzelnen Geröllkomponenten von Kiesen. Durch die Bestimmung der Lösegeschwindigkeiten der zuvor getrennten Geröllkomponenten erfolgte die Zuordnung von reaktiven Bestandteilen der Kiese.

Zur Klärung des Einflusses von Zusatzstoffen auf die Löslichkeit von Gesteinskörnungen in alkalischen Lösungen wurden Untersuchungen mit Microsilica und Metakaolin durchgeführt. Bei der Beurteilung der Zusatzstoffe stellte sich im Gegensatz zur Gesteinskörnung heraus, dass die Phase 0 mit berücksichtigt werden muss. Die Löseversuche mit Microsilica zeigten eine sehr hohe Lösegeschwindigkeit in der Phase 0 und eine Reduzierung der ursprünglich hohen Lösegeschwindigkeiten einer reaktiven Gesteinskörnung in den Phasen 1 bis 3. Die entsprechend verringerten und später einsetzenden Balkendehnungen beim Einsatz von Microsilica im 40 °C-Betonversuch bestätigte die Analysen der Löseversuche. Durch die Verwendung von Metakaolin anstelle von Microsilica konnte ab einer bestimmten Zugabemenge im Löseversuch die Löslichkeit der reaktiven Gesteinskörnung gestoppt werden. Im 40 °C-Betonversuch reichten die geringen Mengen des Metakaolins nicht aus, um eine schädigende AKR im Beton zu inhibieren. Jedoch konnte die Inhibierung der partiellen Auflösung einer Gesteinskörnung im Löseversuch durch die Anwesenheit des gelösten  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus dem Zusatzstoff belegt werden.

Die Untersuchung von weiteren Gesteinskörnungen und Zusatzstoffen sowie deren Kombination in Löse- und Betonversuchen sind für ein besseres Verständnis der Alkaliaktivität der Gesteinskörnungen und der Wirkungsweise von Zusatzstoffen unerlässlich. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode entwickelt, welche es erlaubt, die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung sicher und schnell zu beurteilen. Besonders vorteilhaft bei der Methode sind die direkte Prüfung der Gesteinskörnung an der originalen Korngröße (Lieferkörnung), wie diese auch im Beton eingesetzt wird, die zementunabhängige Prüfung sowie die einfache experimentelle Durchführung und Auswertung. Durch die Ermittlung der Lösegeschwindigkeiten im Löseversuch kann der Beitrag der Gesteinskörnung zur AKR genauer als bisher möglich beschrieben werden und somit eine abgestufte Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung erfolgen. Um aus dieser Methode ein Testverfahren zu entwickeln und Grenzwerte für verschiedene Alkaliempfindlichkeitsklassen festzulegen, sollte eine größere Datenbasis von Gesteinskörnungsuntersuchungen erstellt werden. Aus den bisherigen Versuchsergebnissen lassen sich mögliche Kriterien für die Lösegeschwindigkeiten ableiten. In der Tabelle 17 sind diese Kriterien den Ergebnissen des 40 °C-Betonversuchs gegenübergestellt. Diese und weitere Grenzwertbedingungen sind durch nachfolgende Forschungen für die Einstufung der Gesteinskörnungen in verschiedene Alkaliempfindlichkeitsklassen zu überprüfen. Ausblickend auf den weiteren Forschungsbedarf ist mit dieser Methode auch die Prüfung von Sanden denkbar.

Tabelle 17: Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit der untersuchten Gesteinskörnungen - 40 °C-Betonversuch (blau: EI-S, braun: EIII-S) und 80 °C-Löseversuch in 0,1 M KOH-Lösung (grün: nicht reaktiv, gelb: grenzwertig reaktiv, rot: reaktiv, hellrot: sehr reaktiv)

	40 °C-Betonversuch				80 °C-Löseversuch in 0,1 M KOH-Lösung					
	Dehnung in mm/m		Rissbreite in mm		Lösegeschwindigkeit in mg/l/d			Kriterium der Lösegeschwindigkeit		
	270 d	360 d	270 d	360 d	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
GK F	0,28	0,29	0,00	0,00	1	3	2	≤ 5 mg/l/d	≤ 5 mg/l/d	≤ 5 mg/l/d
GK G	0,34	0,38	0,00	0,00	1	0	-1			
GK E	0,39	0,41	0,00	0,00	10	7	5	≤ 10 mg/l/d	< Phase 1	< Phase 2
GK 4	0,43	0,43	0,00	0,00	12	9	3	≤ 15 mg/l/d	< Phase 1	≤ 3 mg/l/d
GK Hr	0,52	0,52	0,00	0,00	25	17	3	≤ 25 mg/l/d	< Phase 1	≤ 3 mg/l/d
GK 3	0,50	0,50	0,00	0,50	13	13	15	≤ 15 mg/l/d	≤ Phase 1	> Phase 2
GK D	0,78	0,80	0,30	0,70	12	10	16			
GK 2	0,50	0,52	0,85	1,50	19	13	8	≥ 15 mg/l/d	≥ 10 mg/l/d	≥ 5 mg/l/d
GK 1	1,33	1,33	0,30	0,35	23	15	9			
GK C	0,91	0,94	0,30	0,55	15	25	15			
GK B	1,54	1,56	0,20	0,20	35	32	24			
GK A	2,28	2,31	0,30	0,30	46	64	36	≥ 40 mg/l/d	≥ Phase 1	≥ 30 mg/l/d
GK Hg	0,93	0,93	0,20	0,25	68	68	24	≥ 60 mg/l/d	≤ Phase 1	<< Phase 2
GK K	0,68	0,72	0,00	0,00	101	57	35	≥ 90 mg/l/d	<< Phase 1	<< Phase 2

Die Untersuchungen mit den Zusatzstoffen haben gezeigt, dass neben der Gesteinskörnung selbst auch der Einfluss von Zusatzstoffen auf die Löslichkeit von Gesteinskörnungen beurteilt werden kann. Mit dieser Methode konnte der löseinhibierende Effekt des aluminiumhaltigen Zusatzstoffes Metakaolin auf die partielle Auflösung einer reaktiven Gesteinskörnung nachgewiesen werden. Es ist nun möglich, den Anteil des Zusatzstoffes bezogen auf die Gesteinskörnung, der für eine Inhibierung der Oberfläche einer Gesteinskörnung im Alkalischen notwendig ist, genau zu ermitteln. Weitere Forschungen sind erforderlich, um die an reinen KOH-Lösungen erzielten Ergebnisse auf die Verhältnisse in Porenlösungen in Betonen zu übertragen und dadurch den Einsatz des Zusatzstoffes auf die jeweilige Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung abzustimmen. Schließlich sollten weitere Zusatzstoffe mit Löseversuchen untersucht werden, um die Methode auch hier weiterzuentwickeln.

## Literaturverzeichnis

- [1] O. Aßbrock, A. Becke, T. Bernhofen, B. Hauer, T. Kaczmarek, U. Lotz, U. Tesch und U. Wiens, Nachhaltiges Bauen mit Beton, Erkrath: BetonMarketing Deutschland GmbH, 2011.
- [2] C. Müller, S. Palm, A. Wolter und T. Böhne, „Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton,“ *Beton*, Nr. 64, pp. 305-309, 2014.
- [3] T. Stanton, „Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate,“ *American Society of Civil Engineers*, Nr. 66, pp. 59-81, 1940.
- [4] DAFStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [5] B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland und P. Lunk, „Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 37, pp. 483-491, 2007.
- [6] J. Lindgard, M. Thomas, E. Sellevold, B. Pedersen, Ö. Anidc-Cakir, H. Justnes und T. Rønning, „Alkali-silica reaction (ASR) - performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prisms expansion,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 53, pp. 68-90, 2013.
- [7] M. Thomas, B. Fournier, K. Folliard, J. Ideker und M. Shehata, „Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 36, pp. 1842-1856, 2006.
- [8] J. Stark und B. Wicht, Dauerhaftigkeit von Beton - Der Baustoff als Werkstoff., Berlin: F.-A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2001.
- [9] J. Stark, E. Freyburg, K. Seyfarth, C. Giebson und D. Erfurt, „Bewertung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Nr. 8, pp. 500-510, 2007.
- [10] A. Shayan, G. Quick, C. Lancucki und S. Way, „Investigations of some Greywacke aggregates for alkali-aggregate reactivity,“ in *9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London, 1992.
- [11] D. Heinz und K. Schmidt, „Lösungsansätze zur Vermeidung von AKR-Schäden,“ *Straße und Autobahn*, Nr. 5, pp. 282-289, 2008.
- [12] K.-J. Hüniger, Zum Reaktionsmechanismus präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz bei ihrer Verwendung als Gesteinskörnung im Beton, Cottbus: Habilitation, 2005.
- [13] J. E. Gillott, „Mechanism and kinetics of expansion in the alkali-carbonate rock reaction,“ *Canadian Journal of Earth Sciences*, Nr. 1, pp. 121-145, 1964.

- 
- [14] T. Katayama, „The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 40, pp. 643-675, 2010.
- [15] P. E. Grattan-Bellew, L. D. Mitchell, J. Margeson und D. Min, „Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR=ASR?,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 40, pp. 556-562, 2010.
- [16] S. Thoke-Weidlich, Alkaliionendiffusion in carbonatisierte und nicht carbonatisierte Betone, Hannover: Dissertation, 2002.
- [17] CUR - Recommendation 89, Measures to prevent damage to concrete by alkali-silica reaction (ASR), Gouda: CUR, 2008.
- [18] F. Hunkeler, C. Merz und P. Kronenberg, Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR), Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, 2007.
- [19] American Association of State and Highway Transportation Officials, PP 65-11 - Standard Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction, Washington: Federal Highway Administration, 2011.
- [20] Canadian Standards Association, Standard Practice to Identify Degree of Alkali-Aggregate Reactivity of Aggregates and to Identify Measures to Avoid Deleterious Expansion Concrete, Mississauga: Canadian Standards Association, 2000.
- [21] J. Lindgard, Ö. Andic-Cakir, I. Fernandes, T. F. Ronning und M. D. Thomas, „Alkali-silica reaction (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 42, pp. 223-243, 2012.
- [22] K. Folliard, R. Barborak, T. Drimalas, L. Du, S. Garber, J. Ideker, S. Williams, M. Juenger, M. D. Thomas und B. Fournier, „Preventing Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in New Concrete,“ Center for Transportation Research, Austin, Texas, 2006.
- [23] B. Fournier, R. Chevrier, M. Grosbois, R. Lisella, K. Folliard, J. Ideker, M. Shehatad, M. Thomas und S. Baxter, „The accelerated concrete prism test (60 °C): Variability of the test method and proposed expansion limits,“ in *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Beijing, 2004, pp. 314-323.
- [24] J. Ideker, K. Folliard, B. Fournier und M. Thomas, „The Role of "Non-reactive" Aggregates in the Accelerated (60 °C) Concrete Prism Test,“ in *Research & Development Information Serial No. 3021*, Skokie, Portland Cement Association, 2006, pp. 45-70.
- [25] E. Siebel, M. Böhm, I. Borchers, J. Bokern, C. Müller und E. Schäfer, „AKR-Prüfverfahren - Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz,“ in *16. Internationale Baustofftagung*, Weimar, Finger-Institut für Baustoffkunde, 2006, pp. 0373-0388.

- 
- [26] K.-J. Hüniger, C. Hübner, Y. Scholz und J. Kronemann, „Changes of pore solution composition under accelerated mortar bar and concrete prism test conditions,“ in *14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, Austin, 2012.
- [27] L. Franke, DAfStb-Schnelltest auf Alkali-Reaktion. Abschlussbericht, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007.
- [28] A. Shayan, A. Xu und H. Morris, „Comparative study of the concrete prism test (CPT 60 °C, 100 % RH) and other accelerated tests,“ in *Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*, Trondheim, Norwegen, 2008.
- [29] AiF-Forschungsvorhaben-Nr.15323N, „Auswirkung der Alkalireaktivität von Prüfsanden auf die Bewertung potentiell alkalireaktiver Gesteinskörnungen,“ Forschungsinstitut der Zementindustrie, 2010.
- [30] J. Bokern, Betonprüfungen zur Beurteilung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion: Auswirkungen der klimatischen Bedingungen auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen, Düsseldorf: Dissertation, 2009.
- [31] A. Leemann und B. Lothenbach, „The influence of potassium-sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali-aggregate reaction,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 38, pp. 1162-1168, 2008.
- [32] P. Rivard, M.-C. Bérubé, J.-P. Ollivier und G. Ballivy, „Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 33, pp. 1147-1153, 2003.
- [33] P. Rivard, M. Bérubé, J. Ollivier und G. Ballivy, „Decrease of pore solution alkalinity in concrete tested for alkali-silica reaction,“ *Materials and Structures*, Nr. 40, pp. 909-921, 2007.
- [34] H. Kagimoto, I. Inoshita und M. Kawamura, „Threshold OH<sup>-</sup> ion concentration in pore solution of mortar using alkali reactive aggregates,“ in *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, Vol. II, Beijing, 2004, pp. 728-735.
- [35] R. Oberholster und G. Davies, „An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates,“ *Cement and Concrete Research*, Bd. 2, Nr. 16, pp. 181-189, 1986.
- [36] B. Fournier, M.-A. Bérubé und C. Rogers, „Canadian Standards Association (CSA) standard practice to evaluate potential alkali-reactivity of aggregates and to select preventive measures against alkali-aggregate reaction in new concrete structures,“ in *11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Québec, 2000.
- [37] T. Powers und H. Steinour, „An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction Part 1 - The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion,“ *Journal of the American Concrete Institute*, Bd. 26, Nr. 6, pp. 497-516, 1955.

- 
- [38] T. Powers und H. Steinour, „An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction Part 2 - A Hypothesis Concerning Safe and Unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete,“ *Journal of the American Concrete Institute*, Bd. 51, Nr. 4, pp. 785-812, 1955.
- [39] F. Locher und S. Sprung, „Ursache und Wirkungsweise der Alkaliereaktion,“ in *Betontechnische Berichte*, Düsseldorf, Forschungsinstitut der Zementindustrie, 1973, pp. 101-123.
- [40] S. Chatterji, N. Thaulow und A. Jensen, „Studies of alkali-silica reaction. Part 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 18, pp. 363-366, 1988.
- [41] S. Chatterji, N. Thaulow und A. Jensen, „Studies of alkali-silica-reaction. Part 5. Verification of a newly proposed reaction mechanism,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 19, pp. 177-183, 1989.
- [42] L. Dent Glasser und N. Kataoka, „The chemistry of 'alkali-aggregate' reaction,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 11, pp. 1-9, 1981.
- [43] M. Moranville-Regourd, „Modelling of Expansion Induced by ASR - New Approaches,“ *Cement and Concrete Composites*, Nr. 19, pp. 415-425, 1997.
- [44] H. Wang und J. Gillot, „Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 21, pp. 647-654, 1991.
- [45] E. Schäfer, Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins, Clausthal: Dissertation, 2004.
- [46] E. Garcia-Diaz, D. Bulteel, Y. Monnin, P. Degrugilliers und P. Fasseu, „ASR pessimum behaviour of siliceous limestone aggregates,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 40, pp. 546-549, 2010.
- [47] W. Wieker, C. Hübert, D. Heidemann und R. Ebert, „Zur Reaktion von Alkaliverbindungen mit Kieselsäure und Silicaten im Hinblick auf betonschädigende Dehnungsreaktionen,“ in *14. Internationale Baustofftagung IBAUSIL*, Vol 1, Bd. 1, Weimar, 2000, pp. 0911-0929.
- [48] X. Hou, L. Struble und R. Kirkpatrick, „Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 34, pp. 1683-1696, 2004.
- [49] W. Aquino, D. Lange und J. Olek, „The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products,“ *Cement and Concrete Composites*, Bd. 23, Nr. 6, pp. 485-493, 2001.
- [50] T. Mansfeld, Das Quellverhalten von Alkalisilikatgelen unter Beachtung ihrer Zusammensetzung, Weimar: Dissertation, 2008.
- [51] IGF-Vorhaben-Nr.15248N, „Auswirkungen der Gefügedichte auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion,“ Forschungsinstitut der Zementindustrie, 2010.

- 
- [52] VDZ, Tätigkeitsbericht 2009-2012, Düsseldorf: Bau+Technik GmbH, 2012.
- [53] M. Böhm und S. Baetzner, „Die Auswirkungen der Alkalität der Porenlösung auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion,“ Abschlussbericht des Forschungsinstitut der Zementindustrie, AiF-Vorhaben-Nr. 14242 N, 2007.
- [54] J. Lindgard, P. J. Nixon, I. Borchers, B. Schouenborg, B. J. Wigum, M. Haugen und U. Akesson, „The EU "Partner" Project - European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 40, pp. 611-635, 2010.
- [55] M. Böhm, E. Schäfer und S. Baetzner, „Einfluss der Alkalität der Porenlösung auf die Auslösung einer schädigenden AKR,“ in *16. Internationale Baustofftagung Bd. 2*, Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, 2006, pp. 435-442.
- [56] A. Damgaard Jensen, S. Chatterji, P. Christensen, N. Thaulow und H. Gudmundsson, „Studies of alkali-silica-reaction - part I a comparison of two accelerated test methods,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 12, pp. 641-647, 1982.
- [57] S.-Y. Hong und F. Glasser, „Alkali Binding in cement oastes Part I. The C-S-H phase,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 29, pp. 1893-1903, 1999.
- [58] S. Multon, M. Cyr, A. Sellier, P. Diederich und L. Petit, „Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 40, pp. 508-516, 2010.
- [59] A. Maas, J. Ideker und M. Juenger, „Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 37, pp. 166-174, 2007.
- [60] A. Shayan, G. Quick und C. Lancucki, „Morphological, mineralogical and chemical features of steam-cured concretes containing densified silica fume and various alkali levels,“ *Advances in Cement Research*, Bd. 5, Nr. 20, pp. 151-162, 1993.
- [61] H. Cheng-yi und R. Feldman, „Influence of silica fume on the microstructural development in cement mortars,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 15, pp. 285-294, 1985.
- [62] M. Cyr, P. Rivard und F. Labrecque, „Reduction of ASR-expansion using powders ground from various sources of reactive aggregates,“ *Cement & Concrete Composites*, Nr. 31, pp. 438-446, 2009.
- [63] Y. Scholz, K.-J. Hüniger, C. Hübert und J. Kronemann, „Untersuchungen zum Wirkungsmechanismus spezieller Zusatzstoffe im Beton zur Vermeidung einer AKR,“ in *17. Internationale Baustofftagung*, Weimar, 2009.
- [64] S. Urhan, „Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 17, pp. 141-152, 1987.



- 
- [65] S.-Y. Hong und F. Glasser, „Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels: Part II. Role of alumina,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 32, pp. 1101-1111, 2002.
- [66] T. Ramlochan, M. Thomas und R. Hooton, „The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature: Part II: Microstructural and microchemical investigations,“ *Cement and Concrete Research*, Bd. 34, Nr. 6, pp. 1341-1356, 2004.
- [67] A. Dressler, Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton, München: Dissertation, 2013.
- [68] T. Chappex und K. Scrivener, „Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 42, pp. 1049-1054, 2012.
- [69] T. Chappex, The role of aluminium from supplementary cementitious materials in controlling alkali-silica reaction, Lausanne: Dissertation, 2012.
- [70] X. Pardal, I. Pochard und A. Nonat, „Experimental study of Si-Al substitution in calcium-silicate-hydrate (C-S-H) prepared under equilibrium conditions,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 39, pp. 637-643, 2009.
- [71] S. Weber, H. Schäffler, E. Bruy und G. Schelling, Baustoffkunde Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung der Baustoffkunde, Würzburg: Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 2012.
- [72] T. Wächli und E. Brühweiler, Tragverhalten von Kunstbauten mit Alkali-Aggregat-Reaktionen (AAR): Sachstandsbericht, Zürich: Schweiz Bundesamt für Straßen, 2005.
- [73] G. Strübel, Mineralogie: Grundlagen und Methoden, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1995.
- [74] M. Okrusch und S. Matthes, Mineralogie Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, Berlin: Springer Verlag, 2009.
- [75] P. E. Grattan-Bellew, „Petrographic and Technological Methods for Evaluation of Concrete Aggregates,“ in *Handbook of Analytical Techniques in Concrete science and technology*, Norwich, Noyes Publications, 1999, pp. 63-104.
- [76] E. Freyburg und D. Schliffkowitz, „Bewertung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen nach petrografischen und mikrostrukturellen Kriterien,“ in *16. Internationale Baustofftagung Tagungsbericht Band 2*, Weimar, 2006, pp. 355-372.
- [77] H.-R. Wenk, P. J. M. Monteiro und K. Shomglin, „Relationship between aggregate microstructure and mortar expansion. A case study of deformed granitic rocks from the Santa Rosa mylonite zone,“ *Journal of Materials Science*, Nr. 43, pp. 1278-1285, 2008.
- [78] S. Lukschova, „Alkali-silica reaction of aggregates in real concrete and mortar specimen,“ *Acta Research Reports*, Nr. 18, pp. 79-86, 2009.

- 
- [79] K.-J. Hüngrer, S. Hill und H. Weidmüller, „The self-inhibition process of certain greywackes,“ in *12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Beijing, China, 2004.
- [80] K.-J. Hüngrer, „Zum Schädigungsmechanismus von Grauwacken im alkalischen Milieu von Beton,“ in *16. Internationale Baustofftagung*, Weimar, 2006.
- [81] H. Pichler und C. Schmitt-Riegraf, *Gesteinsbildende Minerale im Dünnschliff*, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1993.
- [82] K. Dombrowski, *Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton*, Weimar: Dissertation, 2003.
- [83] DIN EN 932-3:2003-12: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil3: Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrografischen Beschreibung, Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [84] A. C289, Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), American Society for Testing and Materials, 1994.
- [85] S. Sprung und H.-M. Sylla, „Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit und Wasseraufnahme von Betonzuschlagstoffen,“ *Zement Kalk Gips International*, Nr. 2, pp. 63-75, 1997.
- [86] X. X. Gao, M. Cyr, S. Multon und A. Sellier, „A comparison of methods for chemical assessment of reactive silica in concrete aggregates by selective dissolution,“ *Cement & Concrete Composites*, Nr. 37, pp. 82-94, 2013.
- [87] F. Locati, S. Marfil, E. Baldo und P. Maiza, „Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> release from potassic and calcic-sodic feldspars into alkaline solutions,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 40, pp. 1189-1196, 2010.
- [88] D. Lu, X. Zhou, Z. Xu, X. Lan, M. Tang und B. Fournier, „Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 36, pp. 1157-1165, 2006.
- [89] Y. Wang, L. Mo, M. Deng und M. Tang, „Thermodynamic analysis on decomposition of feldspar mineral under alkali condition,“ in *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol I*, Beijing, 2004, pp. 211-220.
- [90] Y. Wang, M. Deng und M. Tang, „Alkali release from aggregate and the effect on AAR expansion,“ *Materials and Structures*, Nr. 41, pp. 159-171, 2008.
- [91] D. Constantiner und S. Diamond, „Alkali release from feldspars into pore solutions,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 33, pp. 549-554, 2003.
- [92] K.-J. Hüngrer, „The contribution of quartz and the role of aluminium for understanding the AAR with greywacke,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 37, pp. 1193-1205, 2007.

- 
- [93] K.-J. Hüniger, „The Role of Aluminium for Understanding the AAR with Greywacke,“ in *8th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, Montréal, Kanada, 2006.
- [94] S. Hill, Zur direkten Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz anhand deren Kieselsäure- und Aluminiumlöseverhalten, Cottbus: Dissertation, 2004.
- [95] K.-J. Hüniger, R. Bachmann, Y. Scholz, C. Hübert und X. Mo, „An accelerated chemical method for aar directly at aggregate grains,“ in *13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Trondheim, Norwegen, 2008.
- [96] B. Fahlke, W. Wieker, H. Fürtig, W. Roscher und R. Seidel, „Untersuchungen zum Bildungsmechanismus von Molsieben,“ *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, Nr. 439, pp. 95-102, 1978.
- [97] W. Loewenstein, „The distribution of aluminium in the tetrahedra of silicates and aluminates,“ *American Mineralogist*, Nr. 39, pp. 92-96, 1954.
- [98] J. Labrid und J. Duquerroix, „Thermodynamic and kinetic aspects of the dissolution of quartz-kaolinite mixtures by alkalis,“ *Revue de l'institut français du pétrole*, Bd. 46, Nr. 1, pp. 41-58, 1991.
- [99] J. Labrid, „Modelling of high pH sandstone dissolution,“ *The Journal of Canadian Petroleum Technology*, Bd. 30, Nr. 6, pp. 67-74, 1991.
- [100] E. H. Oelkers, J. Schott, J.-M. Gauthier und T. Herrero-Roncal, „An experimental study of the dissolution mechanism and rates of muscovite,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Nr. 72, pp. 4948-4961, 2008.
- [101] E. H. Oelkers und S. R. Gislason, „The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH = 3 and 11,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 65, Nr. 21, pp. 3671-3681, 2001.
- [102] B. Bickmore, K. Nagy, A. Gray und R. Brinkerhoff, „The effect of  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  on the dissolution rate of quartz,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Nr. 70, pp. 290-305, 2006.
- [103] G. D. Saldi, S. J. Köhler, N. Marty und E. H. Oelkers, „Dissolution rates of talc as a function of solution composition, pH and temperature,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Nr. 71, pp. 3446-3457, 2007.
- [104] T. Chappex und K. Scrivener, „Controlling alkali-silica reaction by understanding the contribution of aluminium provided by supplementary cementitious materials,“ in *14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, Austin, 2012.
- [105] P. Dove, „The dissolution kinetics of quartz in aqueous mixed cation solutions,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 63, Nr. 22, pp. 3715-3727, 1999.

- 
- [106] J. R. Houston, J. L. Herberg, R. S. Maxwell und S. A. Carroll, „Association of dissolved aluminium with silica: Connecting molecular structure to surface reactivity using NMR,“ *Geochimica et Cosmochimica*, Nr. 72, pp. 3326-3337, 2008.
- [107] P. Hagelia und I. Fernandes, „On the aar susceptibility of granitic and quartzitic aggregates in view of petrographic characteristics and accelerated testing,“ in *14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, Austin, 2012.
- [108] J. Icenhower und P. Dove, „The dissolution kinetics of amorphous silica into sodium chloride solutions: Effects of temperature and ionic strength,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 64, Nr. 24, pp. 4193-4203, 2000.
- [109] A. Berninger, Mikrostrukturelle Eigenschaften von Quarz als Bestandteil spät reagierender, alkaliempfindlicher Zuschläge, Weimar: Dissertation, 2004.
- [110] M. Dove und J. D. Rimstidt, „Silica-water interactions,“ *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Nr. 29, pp. 259-308, 1994.
- [111] B. Merkel und B. Planer-Friedrich, Grundwasserchemie: Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme, Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [112] E. Riedel, Allgemeine und Anorganische Chemie, Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2010.
- [113] D. Stephan, O. Henning und D. Knöfel, Baustoffchemie Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [114] P. Dove und S. Elston, „Dissolution kinetics of quartz in sodium chloride solutions: Analysis of existing data and a rate model for 25°C,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Nr. 56, pp. 4147-4156, 1992.
- [115] G. Davies und R. Oberholster, „Alkali-silica reaction products and their development,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 18, pp. 621-635, 1988.
- [116] P. Wijnen, T. Beelen, J. Haan, C. Rummens, L. Ven und R. Santen, „Silica gel dissolution in aqueous alkali metal hydroxides,“ *Journal of Non-Crystalline Solids*, Nr. 109, pp. 85-94, 1989.
- [117] C. Hübner und K.-J. Hüniger, „Untersuchungen zum Löseprozess von Gesteinskörnungen im alkalischen Medium,“ in *17. Internationale Baustofftagung*, Weimar, 2009.
- [118] D. Lu, L. Mei, Z. Xu, M. Tang und B. Fournier, „Alteration of alkali reactive aggregates autoclaved in different alkali solutions and application to alkali-aggregate reaction in concrete (I) Alteration of alkali reactive aggregates in alkali solutions,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 36, pp. 1176-1190, 2006.

- 
- [119] A. Leemann und B. Lothenbach, „The Na<sub>2</sub>O-Equivalent of cement - A universal parameter to assess the potential alkali-aggregate reactivity of concrete?“, in *Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*, Trondheim, Norwegen, 2008.
- [120] W. Wieker, C. Hübert, R. Ebert und D. Heidemann, „Bedeutung der relativen Feuchtigkeit für die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) an einem chemischen Modell für diese Reaktion“, in *Feuchtetag '99 Umwelt - Messverfahren - Anwendungen*, BAM, Berlin, 1999.
- [121] H. Marzouk und S. Langdon, „The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete“, *Cement and Concrete Composites*, Nr. 25, pp. 549-556, 2003.
- [122] R. Möhring, Baustoffkenntnis, Köln: Werner Verlag, 2011.
- [123] K. Walz, „Beziehung zwischen Wassermenge, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit“, *Beton*, Bd. 20, Nr. 11, pp. 499-503, 1970.
- [124] T. Teichmann, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Kassel: Dissertation, 2007.
- [125] DIN EN 206-1:2000: Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2000.
- [126] C. Pilloud, „Vergleichsversuch Wasseraufnahme von Gesteinskörnungen (SN EN 1097-6)“, in *Frühjahrstagung 2006: Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie*, Egerkingen, 2006.
- [127] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und Wasseraufnahme, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [128] A. Dressler, C. Matschi, K. Schmidt und D. Heinz, „Einfluss der Diffusion auf eine Alkali-Kieselsäure Reaktion im Beton - Untersuchungen zum Alkalihaushalt und den Transporteigenschaften“, in *17. Internationale Baustofftagung*, Weimar, 2009.
- [129] J. Bonzel, J. Krell und E. Siebel, „Alkali-reaktion im Beton“, in *Betontechnische Berichte 1986-1988*, Düsseldorf, pp. 57-77.
- [130] K. Bollmann, Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen, Weimar: Dissertation, 2000.
- [131] U. Dahme, Chlorid in karbonatisierendem Beton Speicher- und Transportmechanismen, Essen: Dissertation, 2006.
- [132] T. Bier, Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton, Karlsruhe: Dissertation, 1988.

- 
- [133] X. Gao, S. Multon, M. Cyr und A. Sellier, „Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 44, pp. 25-33, 2013.
- [134] R. Bachmann, K.-J. Hüngrer und Y. Scholz, „Entwicklung eines direkten Prüfverfahrens zur Alkaliempfindlichkeitsbeurteilung von Gesteinskörnungen - der BTU-SP-Schnelltest,“ *Forum der Forschung*, Nr. 20, pp. 73-78, 2007.
- [135] R. Bachmann, K.-J. Hüngrer, Y. Scholz und U. Hahn, „BTU-SP-Schnelltest zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen,“ *Beton*, Nr. 4, pp. 138-143, 2009.
- [136] DIN EN 1936: Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [137] R. Bachmann, Über das Zusammenspiel chemischer und physikalischer Gesteinsparameter zum besseren Verständnis des Ablaufs einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Cottbus: Dissertation, 2013.
- [138] S. Multon, A. Sellier und M. Cyr, „Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 39, pp. 490-500, 2009.
- [139] G. Neroth und D. Vollenschaar, Wendeorst Baustoffkunde, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [140] F. Brandt, Heterogene Reaktionsmechanismen und deren Kinetik an Schichtsilikatoberflächen, Karlsruhe: Dissertation, 2003.
- [141] D. Bosbach, L. Charlet, B. Bickmore und M. Hochella, „The dissolution of hectorite: In-situ, relative observations using atomic force microscopy,“ *American Mineralogist*, Nr. 85, pp. 1209-1216, 2000.
- [142] B. Bickmore, D. Bosbach, M. Hochella, L. Charlet und E. Rufe, „In situ atomic force microscopy study of hectorite and nontronite dissolution: Implications for phyllosilicate edge surface structures and dissolution mechanisms,“ *American Mineralogist*, Nr. 86, pp. 411-423, 2001.
- [143] O. Mielich, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton-Heft 583 - Beitrag zu den Schädigungsmechanismen in Betonen mit langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [144] F. Weise, S. Pirskawetz, U. Müller und B. Meng, „Charakterisierung der Schädigungsprozesse in Betonen mit innovativen Prüftechniken,“ *beton*, Nr. 6, pp. 268-275, 2006.
- [145] DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [146] DIN EN 196-1:2005. Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Berlin: Beuth Verlag, 2005.

- 
- [147] F. Weise, „Neuartige Prüfmethodologien zur Schadensanalyse in Betonen,“ in 52. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton - Forschungskolloquium*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 2011.
- [148] 2. Berichtigung zur DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahme gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [149] 1. Berichtigung zur DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen eine schädigende Alkalireaktion im Beton, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.

## A Anhang

### A.1 Ergebnisse - Mörtel- und Betonversuche

Tabelle A-1: Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Lagerungsdauer [d]	GK 1 [mm]	GK 2 [mm]	GK 3 [mm]	GK 4 [mm]
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,33	0,33	0,31	0,31
7	0,40	0,36	0,35	0,35
14	0,41	0,37	0,37	0,37
28	0,43	0,38	0,38	0,38
56	0,48	0,41	0,39	0,39
84	0,75	0,44	0,41	0,39
112	1,16	0,46	0,44	0,40
140	1,27	0,47	0,45	0,40
168	1,29	0,47	0,46	0,41
196	1,30	0,48	0,48	0,42
224	1,31	0,50	0,48	0,43
252	1,33	0,50	0,48	0,43
280	1,33	0,50	0,50	0,43
308	1,33	0,50	0,50	0,43
336	1,33	0,51	0,50	0,43
364	1,33	0,52	0,50	0,43

Tabelle A-2: Dehnungen - Schnellprüfverfahren der Gesteinskörnungen 1 bis 4

Lagerungsdauer [d]	GK 1 (2/8 mm + 8/16 mm) [mm]	GK 2 (8/16 mm) [mm]	GK 3 (8/16 mm) [mm]	GK 4 (2/8 mm + 8/16 mm) [mm]
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,098	0,067	0,112	0,058
5	0,685	0,454	0,437	0,514
9	1,114	1,258	1,044	0,951
13	1,504	1,884	1,659	1,370



Tabelle A-3: Dehnungen - 40 °C-Betonversuch der Gesteinskörnungen A bis K

Lagerungsdauer [d]	GK A [mm]	GK B [mm]	GK C [mm]	GK D [mm]	GK E [mm]	GK F [mm]	GK G [mm]	GK Hr [mm]	GK Hg [mm]	GK K [mm]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,19	0,22	0,22	0,18	0,18	0,15	0,18	0,23	0,22	0,25
7	0,22	0,25	0,25	0,19	0,21	0,16	0,23	0,29	0,29	0,27
14	0,26	0,24	0,27	0,22	0,21	0,18	0,23	0,33	0,32	0,29
28	0,30	0,31	0,29	0,22	0,25	0,20	0,26	0,36	0,36	0,31
56	0,61	0,50	0,34	0,28	0,27	0,19	0,29	0,41	0,43	0,40
84	1,44	0,93	0,45	0,33	0,31	0,21	0,29	0,45	0,53	0,48
112	2,01	1,31	0,61	0,38	0,32	0,24	0,31	0,47	0,70	0,56
140	2,18	1,46	0,76	0,46	0,34	0,25	0,31	0,49	0,86	0,61
168	2,21	1,48	0,84	0,57	0,35	0,27	0,35	0,50	0,90	0,65
196	2,25	1,52	0,88	0,66	0,38	0,28	0,34	0,51	0,91	0,68
224	2,26	1,53	0,89	0,72	0,38	0,30	0,35	0,51	0,92	0,67
252	2,27	1,53	0,89	0,74	0,38	0,30	0,34	0,50	0,91	0,68
280	2,28	1,54	0,91	0,78	0,39	0,28	0,34	0,52	0,93	0,68
308	2,30	1,55	0,92	0,80	0,39	0,29	0,37	0,51	0,92	0,69
336	2,31	1,56	0,93	0,80	0,40	0,29	0,38	0,52	0,93	0,71
364	2,31	1,56	0,94	0,80	0,41	0,29	0,38	0,52	0,93	0,72

Tabelle A-4: Dehnungen - 40 °C-Betonversuch: Gesteinskörnung A + 1,0 M.-% Microsilica, Gesteinskörnung A + 1,0 M.-% Metakaolin

Lagerungsdauer [d]	GK A + 12,8 kg/m <sup>3</sup> Microsilica [mm]	GK A + 12,8 kg/m <sup>3</sup> Metakaolin [mm]
0	0,00	0,00
1	0,21	0,19
7	0,22	0,22
14	0,23	0,23
28	0,25	0,27
56	0,33	0,39
84	0,42	0,65
112	0,69	1,11
140	1,05	1,46
168	1,27	1,62
196	1,41	1,69
224	1,46	1,70
252	1,50	1,71
280	1,50	1,71
308	1,51	1,72
336	1,51	1,73
364	1,51	1,73

## A.2 Ergebnisse - Löseversuche

Tabelle A-5: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C

Lagerungsdauer [d]	GK1 (2/8 mm) [mg/l]	GK1 (8/16 mm) [mg/l]	GK2 (2/8 mm) [mg/l]	GK2 (8/16 mm) [mg/l]	GK3 (2/8 mm) [mg/l]	GK3 (8/16 mm) [mg/l]	GK4 (2/8 mm) [mg/l]	GK4 (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	57,6	47,0	42,3	28,4	35,3	35,5	135,0	64,1
14	136,2	143,5	66,1	39,7	65,3	62,6	231,6	118,9
28	294,4	296,5	116,7	61,5	110,3	91,3	423,8	227,8
56	604,9	915,1	255,4	85,1	180,8	122,2	658,4	398,6
91	1.013,0	1.819,5	462,6	98,5	253,7	174,4	955,8	577,1
112	1.222,6	2.430,2	625,7	131,7	304,1	221,8	1.103,9	688,3
168	2.082,6	4.839,1	1.254,7	363,3	520,9	427,0	1.695,4	1.125,3
224	2.363,5	6.409,3	1.741,6	591,5	611,8	541,2	1.838,9	1.325,7
273	2.907,3	8.219,2	2.216,9	850,4	688,9	674,9	1.931,6	1.435,5
360	3.451,1	10.029,0	3.415,2	1.723,0	1.101,7	1.125,3	2.103,1	1.713,1

Tabelle A-6: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C

Lagerungsdauer [d]	GK1 (2/8 mm) [mg/l]	GK1 (8/16 mm) [mg/l]	GK2 (2/8 mm) [mg/l]	GK2 (8/16 mm) [mg/l]	GK3 (2/8 mm) [mg/l]	GK3 (8/16 mm) [mg/l]	GK4 (2/8 mm) [mg/l]	GK4 (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	16,4	7,4	4,9	2,7	3,1	1,8	48,7	21,2
14	38,2	18,4	8,1	4,8	8,3	5,8	100,1	48,3
28	57,8	26,0	12,4	7,7	14,4	10,7	145,7	73,3
56	76,1	35,5	18,6	10,7	23,0	13,8	190,7	106,5
91	91,5	42,6	23,6	12,9	32,1	17,2	232,7	133,4
112	98,5	44,4	24,8	13,0	34,2	19,4	245,0	147,2
168	115,4	51,8	31,8	16,6	42,9	22,0	264,5	172,8
224	129,6	52,2	38,9	17,9	50,1	24,6	277,6	190,1
273	138,3	49,1	41,9	19,5	53,8	26,1	290,6	197,8
360	147,0	46,1	45,3	22,1	62,6	29,8	287,4	203,1

Tabelle A-7: SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnung 1 in 1,0 M KOH-Lösung bei 40 °C mit Feststoff-Laugen-Verhältnis von 1:2

Lagerungsdauer [d]	SiO <sub>2</sub> -Konzentration GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentration GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	SiO <sub>2</sub> -Konzentration GK 1 (8/16 mm) [mg/l]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentration GK 1 (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	146,0	62,4	91,7	30,5
14	355,6	165,0	244,5	70,5
28	653,3	227,5	502,7	116,8
56	924,6	266,0	1.001,6	144,4
91	1.958,7	261,1	2.452,5	152,7
168	3.362,1	253,2	6.091,0	142,8
313	5.035,9	164,4	13.358,2	56,7
360	5.854,4	133,8	16.307,5	31,0

Tabelle A-8: SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 60 °C

Lagerungsdauer [d]	SiO <sub>2</sub> -Konzentration				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentration			
	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	211,9	149,4	103,0	276,6	54,2	13,0	11,5	115,3
14	823,6	707,1	354,6	924,7	100,7	26,7	49,4	211,4
28	1.652,0	1.963,6	792,9	1.806,3	116,2	60,4	44,1	238,6
56	3.384,4	5.125,8	1.994,5	3.600,9	138,9	41,0	57,1	252,1
112	5.908,7	10.234,4	5.155,7	10.409,8	99,8	21,5	33,3	125,1
168	9.070,6	15.435,0	8.391,2	18.945,6	37,0	21,2	34,8	34,8
224	13.242,3	20.283,2	12.733,1	27.361,6	27,4	19,1	34,7	18,8

Tabelle A-9: SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 1,0 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	SiO <sub>2</sub> -Konzentration				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentration			
	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	1512,1	1539,3	1157,6	1458,4	73,0	24,6	21,3	134,0
14	6352,1	7641,2	5410,6	10229,1	137,2	60,1	42,9	266,4
28	11073,0	13610,0	10329,8	21799,5	38,0	0,0	8,4	75,4
56	20537,3	22208,6	24281,1	32025,3	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle A-10: SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,75 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	SiO <sub>2</sub> -Konzentration				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentration			
	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	1086,8	1222,4	858,8	1123,3	60,3	19,5	17,7	104,7
14	4563,0	5406,7	2854,0	6560,7	147,8	43,8	30,6	195,1
28	8397,2	8156,9	6398,0	10446,0	38,5	0,0	43,8	40,8
56	15996,0	15302,9	16209,9	17989,8	0,0	0,0	7,6	0,0

Tabelle A-11: SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Korngruppe 2/8 mm der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,5 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	SiO <sub>2</sub> -Konzentration				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentration			
	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	480,2	418,5	267,1	340,7	51,3	13,5	14,6	98,4
14	2308,5	2376,8	1812,6	1697,2	126,6	29,1	19,1	172,5
28	7825,1	3531,8	6022,1	6995,5	189,5	0,0	19,0	86,9
56	9143,4	7573,1	8659,9	10320,0	7,6	0,0	10,4	3,8

Tabelle A-12: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 1 (8/16 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (8/16 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (8/16 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	145,5	146,4	134,9	116,0	112,9	87,4	159,2	168,0
14	357,2	488,0	378,3	262,8	246,9	223,6	340,9	329,3
28	546,1	753,6	603,8	389,8	426,6	411,1	477,1	483,1
56	741,8	1.111,4	871,8	545,0	827,9	840,7	560,0	620,4

Tabelle A-13: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen 1 bis 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK 1 (2/8 mm) [mg/l]	GK 1 (8/16 mm) [mg/l]	GK 2 (2/8 mm) [mg/l]	GK 2 (8/16 mm) [mg/l]	GK 3 (2/8 mm) [mg/l]	GK 3 (8/16 mm) [mg/l]	GK 4 (2/8 mm) [mg/l]	GK 4 (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	32,6	9,9	8,5	13,1	11,7	7,4	49,1	29,5
14	68,6	21,4	15,8	21,4	17,6	14,1	95,9	53,0
28	85,2	27,2	18,4	24,6	18,3	14,8	113,4	62,5
56	99,7	32,0	20,5	27,9	18,7	14,5	133,5	75,4

Tabelle A-14: Ergebnisse - BTU-SP-Test der Gesteinskörnungen 1 bis 4

	GK 1 2/8 mm	GK 1 8/16 mm	GK 2 2/8 mm	GK 2 8/16 mm	GK 3 2/8 mm	GK 3 8/16 mm	GK 4 2/8 mm	GK 4 8/16 mm
SiO <sub>2</sub> -Konzentration [mg/l]	370,5	435,0	478,8	340,2	251,3	245,1	285,8	283,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Konzentration [mg/l]	59,3	45,5	19,0	25,4	23,6	22,4	116,6	98,8
maximal überschüssiges SiO <sub>2</sub> in Lösung [mg/l]	287,5	371,4	452,2	304,6	218,3	213,7	122,6	145,3
offene Porosität [%]	2,5	2,0	2,1	1,3	2,1	2,0	4,8	3,6

Tabelle A-15: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen A bis D in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK A (2/8 mm) [mg/l]	GK A (8/16 mm) [mg/l]	GK B (2/8 mm) [mg/l]	GK B (8/16 mm) [mg/l]	GK C (2/8 mm) [mg/l]	GK C (8/16 mm) [mg/l]	GK D (2/8 mm) [mg/l]	GK D (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	268,5	193,1	217,5	176,6	156,1	179,3	89,2	71,3
14	794,6	555,7	554,1	551,9	300,8	395,6	237,8	169,1
28	1.706,1	1.437,6	1.092,1	886,7	602,2	854,7	404,9	294,9
56	2.646,3	2.496,6	1.816,3	1.497,5	874,3	1.464,4	922,6	628,4

Tabelle A-16: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen A bis D in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK A (2/8 mm) [mg/l]	GK A (8/16 mm) [mg/l]	GK B (2/8 mm) [mg/l]	GK B (8/16 mm) [mg/l]	GK C (2/8 mm) [mg/l]	GK C (8/16 mm) [mg/l]	GK D (2/8 mm) [mg/l]	GK D (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	4,0	3,3	11,3	8,3	27,3	10,2	8,9	7,0
14	3,7	3,0	13,9	11,4	48,2	17,4	17,2	13,4
28	4,1	3,0	12,6	12,4	65,5	23,1	20,1	17,9
56	0,0	0,0	6,4	7,0	69,3	22,4	15,6	15,4

Tabelle A-17: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen E, F, G und K in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK E (2/8 mm) [mg/l]	GK E (8/16 mm) [mg/l]	GK F (2/8 mm) [mg/l]	GK F (8/16 mm) [mg/l]	GK G (2/8 mm) [mg/l]	GK G (8/16 mm) [mg/l]	GK K (2/8 mm) [mg/l]	GK K (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	105,5	83,8	41,4	26,4	122,9	118,6	534,2	335,5
14	228,7	188,0	79,0	41,6	182,9	154,2	1.669,7	1.183,9
28	357,7	267,8	141,0	78,2	222,1	179,6	2.414,0	2.043,9
56	538,6	353,8	246,9	142,7	222,2	195,2	3.409,0	2.996,4

Tabelle A-18: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen E, F, G und K in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK E (2/8 mm) [mg/l]	GK E (8/16 mm) [mg/l]	GK F (2/8 mm) [mg/l]	GK F (8/16 mm) [mg/l]	GK G (2/8 mm) [mg/l]	GK G (8/16 mm) [mg/l]	GK K (2/8 mm) [mg/l]	GK K (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	13,8	10,7	13,4	9,5	43,6	39,4	0,0	0,0
14	22,7	19,5	26,9	18,0	77,1	55,6	0,0	0,0
28	27,0	24,8	34,4	24,5	99,7	76,4	0,0	0,0
56	27,7	25,2	44,8	38,2	118,9	98,0	1,6	1,8

Tabelle A-19: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen Hr und Hg in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK Hr (2/8 mm) [mg/l]	GK Hr (8/16 mm) [mg/l]	GK Hg (2/8 mm) [mg/l]	GK Hg (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	81,8	223,5	349,0	402,7
14	327,2	505,3	968,4	1.165,9
28	531,7	805,3	1.849,3	2.203,0
56	563,3	935,2	2.587,8	2.754,3

Tabelle A-20: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Gesteinskörnungen Hr und Hg in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	GK Hr (2/8 mm) [mg/l]	GK Hr (8/16 mm) [mg/l]	GK Hg (2/8 mm) [mg/l]	GK Hg (8/16 mm) [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	9,4	7,6	13,5	5,5
14	15,5	10,8	13,0	6,7
28	17,1	11,7	11,0	5,6
56	12,7	6,7	1,1	0,0

Tabelle A-21: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 1 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	Quarz [mg/l]	Kieselschiefer [mg/l]	Quarzit [mg/l]	übrige Sedimente [mg/l]	Rhyolithe/ Andesite [mg/l]	Kristallin [mg/l]	Feuerstein [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	86,5	188,4	167,8	115,6	164,1	95,1	667,7
14	214,4	534,6	385,7	253,7	414,7	223,9	1.655,1
28	383,4	828,9	542,5	382,0	625,7	346,7	2.634,0
56	610,6	1.074,4	684,4	485,3	828,7	508,9	3.767,6

Tabelle A-22: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 1 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	Quarz [mg/l]	Kieselschiefer [mg/l]	Quarzit [mg/l]	übrige Sedimente [mg/l]	Rhyolithe/ Andesite [mg/l]	Kristallin [mg/l]	Feuerstein [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	6,6	12,7	15,8	35,8	338	18,3	2,1
14	11,2	22,7	34,4	76,1	65,1	34,7	2,3
28	15,4	26,1	45,4	98,5	74,2	41,4	2,0
56	19,7	29,5	59,3	122,6	83,0	50,0	0,4

Tabelle A-23: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	Kieselschiefer [mg/l]	Grauwacke [mg/l]	übrige Sedimente [mg/l]	Rhyolithe/ Andesite [mg/l]	Kristallin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	147,4	91,7	122,7	89,7	91,7
14	424,0	193,3	269,4	170,1	210,7
28	707,0	291,7	393,6	259,2	340,0
56	934,2	377,3	513,3	349,6	498,7

Tabelle A-24: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche der Geröllkomponenten der Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung 4 in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C

Lagerungsdauer [d]	Kieselschiefer [mg/l]	Grauwacke [mg/l]	übrige Sedimente [mg/l]	Rhyolithe/ Andesite [mg/l]	Kristallin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	13,4	39,1	29,1	41,9	22,6
14	18,6	66,5	45,3	65,5	36,5
28	25,7	98,5	63,3	89,7	49,5
56	29,4	123,8	77,5	108,7	60,9

Tabelle A-25: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Microsilica (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,9 g Microsilica [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,9 g Microsilica [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,9 g Microsilica [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	883,5	886,1	841,9
14	899,1	1.333,5	1.022,7
28	881,2	2.031,2	1.465,7
56	878,8	2.585,0	2.093,8

Tabelle A-26: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Microsilica (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,9 g Microsilica [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,9 g Microsilica [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,9 g Microsilica [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	883,5	1,8	1,5
14	899,1	1,3	1,4
28	881,2	1,5	1,2
56	878,8	0,7	0,7

Tabelle A-27: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,9 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,9 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,9 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	206,7	179,3	205,7
14	332,2	313,0	328,3
28	386,0	376,6	385,2
56	374,1	369,2	363,7

Tabelle A-28: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (1,0 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,9 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,9 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,9 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	189,1	152,3	179,2
14	273,9	241,0	263,5
28	322,3	289,4	310,4
56	312,0	290,6	300,3

Tabelle A-29: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,1 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,09 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,09 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,09 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	50,3	120,9	82,2
14	54,9	326,4	179,0
28	56,1	487,4	244,7
56	52,5	654,9	358,4

Tabelle A-30: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,1 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,09 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,09 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,09 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	42,0	37,4	39,3
14	44,4	38,5	42,5
28	44,8	35,5	39,9
56	43,7	30,3	34,9



Tabelle A-31: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,3 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,27 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,27 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,27 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	137,7	147,0	143,9
14	140,8	205,4	172,5
28	142,4	273,2	207,3
56	151,9	379,1	283,9

Tabelle A-32: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,3 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,27 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,27 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,27 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	118,5	106,5	109,2
14	112,1	94,7	97,7
28	114,0	93,6	97,6
56	128,7	101,9	110,7

Tabelle A-33: SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,5 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,45 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,45 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,45 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	209,3	168,9	170,2
14	230,2	250,9	233,1
28	249,7	301,5	256,0
56	245,1	307,5	252,5

Tabelle A-34: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Konzentrationen - Löseversuche in 0,1 M KOH-Lösung bei 80 °C: Metakaolin (0,5 M.-%), Gesteinskörnung A

Lagerungsdauer [d]	0,45 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (2/8 mm) + 0,45 g Metakaolin [mg/l]	90 g GK A (8/16 mm) + 0,45 g Metakaolin [mg/l]
0	0,0	0,0	0,0
4	179,5	132,5	140,6
14	187,0	166,9	171,6
28	206,3	178,5	182,9
56	193,8	152,9	162,6